

FFIE/742/110

Godkjent  
Kjeller 26 juni 2001

Torleiv Maseng  
Forskningsjef

**TAKTISK  
SATELLITTKOMMUNIKASJON**

ARNESON Vegard, FARSUND Bodil Hvesser

FFI/RAPPORT-2000/03466

**FORSVARETS FORSKNINGSINSTITUTT**  
**Norwegian Defence Research Establishment**  
Postboks 25, 2027 Kjeller, Norge

POST OFFICE BOX 25  
 N-2027 KJELLER, NORWAY

SECURITY CLASSIFICATION OF THIS PAGE  
 (when data entered)

**REPORT DOCUMENTATION PAGE**

<p>1) PUBL/REPORT NUMBER          FFI/RAPPORT-2000/03466</p> <p>1a) JOB REFERENCE          FFIE/742/110</p>	<p>2) SECURITY CLASSIFICATION          UNCLASSIFIED</p> <p>2a) DECLASSIFICATION/DOWNGRADING SCHEDULE</p>	<p>3) NUMBER OF PAGES          57</p>												
<p>4) TITLE          TAKTISK SATELLITTKOMMUNIKASJON</p> <p>Tactical satellite communications</p>														
<p>5) NAMES OF AUTHOR(S) IN FULL (surname first)          ARNESON Vegard, FARSUND Bodil Hvesser</p>														
<p>6) DISTRIBUTION STATEMENT          Approved for public release. Distribution unlimited. (Offentlig tilgjengelig)</p>														
<p>7) INDEXING TERMS</p> <table border="0"> <tr> <td data-bbox="252 987 762 1021">IN ENGLISH:</td> <td data-bbox="948 999 1098 1021">IN NORWEGIAN:</td> </tr> <tr> <td>a) <u>Satellite communications</u></td> <td>a) <u>Satellittkommunikasjon</u></td> </tr> <tr> <td>b) <u>Link budget</u></td> <td>b) <u>Linkbudsjett</u></td> </tr> <tr> <td>c) <u>Attenuation</u></td> <td>c) <u>Dempning</u></td> </tr> <tr> <td>d) <u>Coverage</u></td> <td>d) <u>Dekning</u></td> </tr> <tr> <td>e) <u>Availability</u></td> <td>e) <u>Tilgjengelighet</u></td> </tr> </table> <p>THESAURUS REFERENCE:</p>			IN ENGLISH:	IN NORWEGIAN:	a) <u>Satellite communications</u>	a) <u>Satellittkommunikasjon</u>	b) <u>Link budget</u>	b) <u>Linkbudsjett</u>	c) <u>Attenuation</u>	c) <u>Dempning</u>	d) <u>Coverage</u>	d) <u>Dekning</u>	e) <u>Availability</u>	e) <u>Tilgjengelighet</u>
IN ENGLISH:	IN NORWEGIAN:													
a) <u>Satellite communications</u>	a) <u>Satellittkommunikasjon</u>													
b) <u>Link budget</u>	b) <u>Linkbudsjett</u>													
c) <u>Attenuation</u>	c) <u>Dempning</u>													
d) <u>Coverage</u>	d) <u>Dekning</u>													
e) <u>Availability</u>	e) <u>Tilgjengelighet</u>													
<p>8) ABSTRACT</p> <p>This report discusses tactical satellite communications, specifically with respect to how Norwegian terrain influences operation of manpack terminals and small vehicular terminals. Special consideration is given to rain attenuation, diffraction and vegetation attenuation. It is found that the use of manpack terminals are of limited value in Norwegian terrain due to low elevation angles of geostationary satellites. On the other hand, with vehicular terminals, this problem is easier to overcome because of increased mobility and due to the fact that the vehicles primary goal merely is to establish a communication link. In fact, this communication link could in many cases be easier to establish via satellite than by a radio link which is normal today.</p>														
<p>9) DATE          27 June 2001</p>	<p>AUTHORIZED BY          This page only          Torleiv Maseng</p>	<p>POSITION          Director of Research</p>												

ISBN-82-464-0518-7

**UNCLASSIFIED**

SECURITY CLASSIFICATION OF THIS PAGE  
 (when data entered)

## INNHOOLD

		<b>Side</b>
1	INNLEDNING	5
2	FREKVENSER FOR SATELLITTKOMMUNIKASJON	5
3	ANTENNER OG ANTENNESTYRING	6
4	LINKBUDSJETT	9
4.1	Dempning	10
4.1.1	Atmosfæredempning	11
4.1.2	Troposfærisk scintillasjon	12
4.1.3	Dempning på grunn av nedbør	12
4.1.4	Vegetasjonsdempning	15
4.1.5	Diffraksjonstap ved satellittkommunikasjon	16
4.2	Terminalens støytemperatur	17
4.3	Transponder “back off” og intermodulasjon	20
4.3.1	Beregning av optimalt signalnivå	22
4.4	Feilkorrigerende koding	23
5	BRUKSOMRÅDER FOR SATKOM	24
5.1	Radiokommunikasjon for SBLR	25
5.2	TADKOM trunkforbindelse	26
5.3	Reserveforbindelse i FDN	27
6	TEKNISKE LØSNINGER	28
6.1	Satellitter	28
6.2	Jordstasjonen	30
6.3	Terminaler for SBLR	30
6.3.1	Terminaler for bruk på GEO satellitter	30
6.3.2	Terminaler for bruk på ikke-GEO satellitter	33
6.3.3	Delkonklusjon	34
6.4	Terminaler for TADKOM trunkforbindelse	34
6.4.1	Terminaler for bruk på GEO satellitter	35
6.4.2	Terminaler for bruk på ikke-GEO satellitter	36
6.4.3	Delkonklusjon	36
7	OPPSUMMERING OG KONKLUSJON	37
	Litteratur	37

	Forkortelser	40
APPENDIKS		
A	SATELLITTENS DEKNINGSOMRÅDE	41
A.1	Antennens elevasjonsvinkel	43
B	BITFEILSANNSYNLIGHET FOR BPSK	45
C	REGNDEMPNING	47
D	FREKVENSAVHENGIGE KOEFFISIENTER VED REGNDEMPNING	50
E	INTELSAT 707 10 W	52
F	DEKNINGSDIAGRAMMER	54
	Fordelingsliste	57

## TAKTISK SATELLITTKOMMUNIKASJON

### 1 INNLEDNING

I SATKOM-studien fra FO/I fra 1999 (1) blir det pekt på at Forsvarets syn på bruk av satellittkommunikasjon (SATKOM) har endret seg siden 1993. Da viste en studie (2) at Forsvaret ikke hadde behov for SATKOM men at det kunne være et aktuelt alternativ. I den siste FO/I-studien blir det pekt på flere anvendelsesområder for SATKOM i hæren. Det blir pekt på behovsområder som blant annet samhandling på operasjonelt og taktisk nivå, tilknytning av TADKOM til stasjonære nett, samhandling mellom kommandoplasser og samband lang rekkevidde (SBLR). Vi har i denne rapporten prøvd å se nærmere på mulighetene og begrensningene for slik kommunikasjon.

Vi har begynt med litt generell teori, som vi mener er viktig for forståelsen av SATKOM. De aktuelle frekvensene for SATKOM blir beskrevet i kapittel 2, mens vi har sett litt på ulike antenner og antennestyling i kapittel 3. Videre blir linkbudsjettet diskutert i kapittel 4. I tillegg til generelle faktorer som støyfaktor og antennevinning, har vi sett nærmere på faktorer som får spesielt stor innvirkning på linkbudsjettet her i Norge. På grunn av liten elevasjonsvinkel, spesielt i nord, vil tap på grunn av vegetasjon og diffraksjon bli et større problem enn lenger sør. I kapittel 5 tar vi for oss det som vi ser som de mest aktuelle bruksområdene for SATKOM i hæren. Dette er radiokommunikasjon for SBLR, trunksamband for TADKOM og reserveforbindelse i Forsvarets Digitale Nett (FDN). Tilslutt ser vi på ulike terminaler i kapittel 6, mens konklusjonen følger i kapittel 7.

### 2 FREKVENSER FOR SATELLITTKOMMUNIKASJON

Vanlige frekvensbånd som brukes i satellittkommunikasjon er gitt i Tabell 2.1. I tillegg vi-

Frekvens	UHF	L	C	X	Ku	Ka	EHF
Opplink	300 MHz	1 GHz	6 GHz	7 GHz	11/12 GHz	30 GHz	44 GHz
Nedlink	250 MHz	2 GHz	4 GHz	8 GHz	14 GHz	20 GHz	20 GHz
Vanlig transponder båndbredde	25 - 125 kHz	3 MHz	36 MHz	40 - 185 MHz	36 - 140 MHz	165 - 330 MHz	50 MHz

Tabell 2.1 Frekvenser for SATKOM

ser også tabellen typiske båndbredder i en transponder i satellitten for de forskjellige frekvensene hvor hele frekvensområdet ofte er større enn båndbredden i en transponder. Dermed benyttes det flere transpondere i en satellitt for å få stor nok kapasitet. Det er forøvrig

stor variasjon i transponderbåndbredden på forskjellige satellitter og også på forskjellige transpondere på en satellitt. Dette er avhengig av transponderens formål.

Som beskrevet i kapittel 4 vil høye frekvenser dempes mer når signalet utsettes for hindringer enn lavere frekvenser. Dette vil til en viss grad oppveies av at antennevinningen er større med samme antennediameter for høye frekvenser. Høye frekvenser gir også større tilgjengelig båndbredde som dermed øker kapasitet eller gir mulighet for bedre beskyttelse gjennom mer koding. Valg av frekvens er avgjørende for kapasitet, tilgjengelighet og til en viss grad størrelse og kostnader ved utstyret.

Til tross for enkelte fordeler i UHF SATKOM båndet som mindre dempning gjennom vegetasjon og lavere utstyrkostnader i forhold til høyere frekvenser, anses det likevel som lite sannsynlig å bruke båndet fordi det er for liten kapasitet til å betjene eksisterende brukere og at det er store problemer med interferens.

### 3 ANTENNER OG ANTENNESTYRING

Antennevinningen  $G$  er definert som forholdet mellom utstrålt effekt i antennens pekeretning og utstrålt effekt fra en isotrop antenne. Dette sier noe om hvor stor gevinst antennen gir i pekeretningen. For sirkulære (parabolske) antenner vil  $G$  være (se (3) side 27):

$$G = \eta \left( \frac{\pi D}{\lambda} \right)^2 \quad (3-1)$$

hvor  $D$  er antennediameteren,  $\eta$  er antenneeffektiviteten og  $\lambda$  er bølgelengden. 3 dB bredden på hovedloben (se figur 3.1) til antennen (der effekten er halvert) er omtrent gitt ved ((3) side 27)

$$\theta_{3dB} \approx \frac{75\lambda}{D} \text{ grader} : \quad (3-2)$$

Figur 3.2 viser  $\theta_{3dB}$  for forskjellige frekvenser som funksjon av antennediameteren  $D$ . Tilsvarende viser figur 3.3 antennevinningen gitt i Ligning (3-1) som funksjon av antennediameteren for de samme frekvensene som i figur 3.2 med effektivitet 0,6.

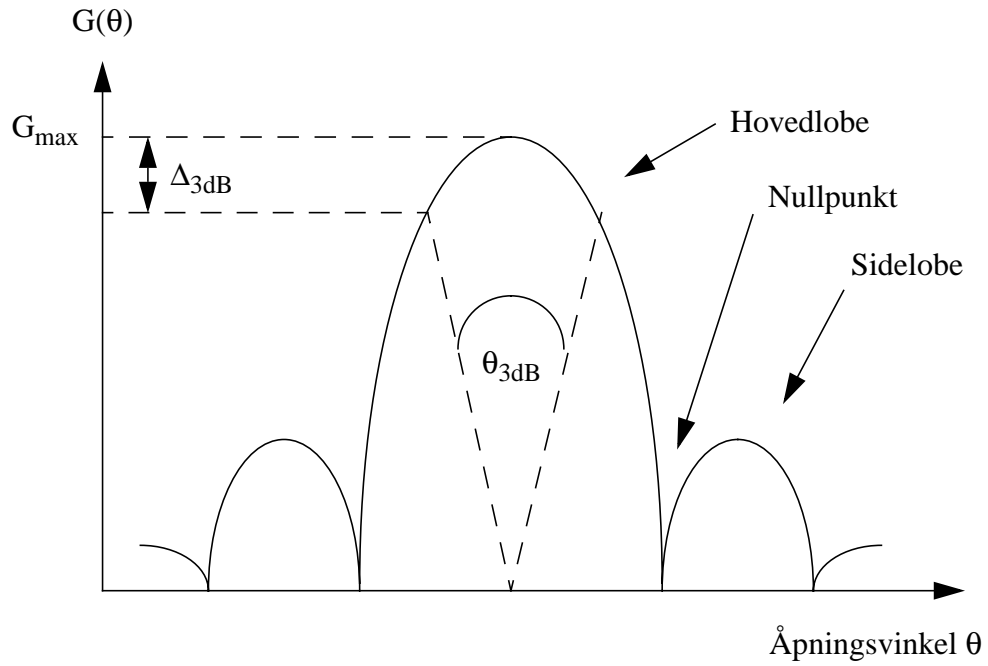
For å redusere interferens mot nabosatellitter har ITU foreslått et referansediagram (se (5) side 350) som sidelobenivået ikke bør overstige. I området 2 - 30 GHz er dette

$$\begin{aligned} G(\theta) &= 32 - 25\log(\theta) & \text{for } \theta_{min} \leq \theta < 48^\circ & \text{ (dBi)} \\ G(\theta) &= -10 & \text{for } 48^\circ \leq \theta < 180^\circ & \text{ (dBi)} \end{aligned} \quad (3-3)$$

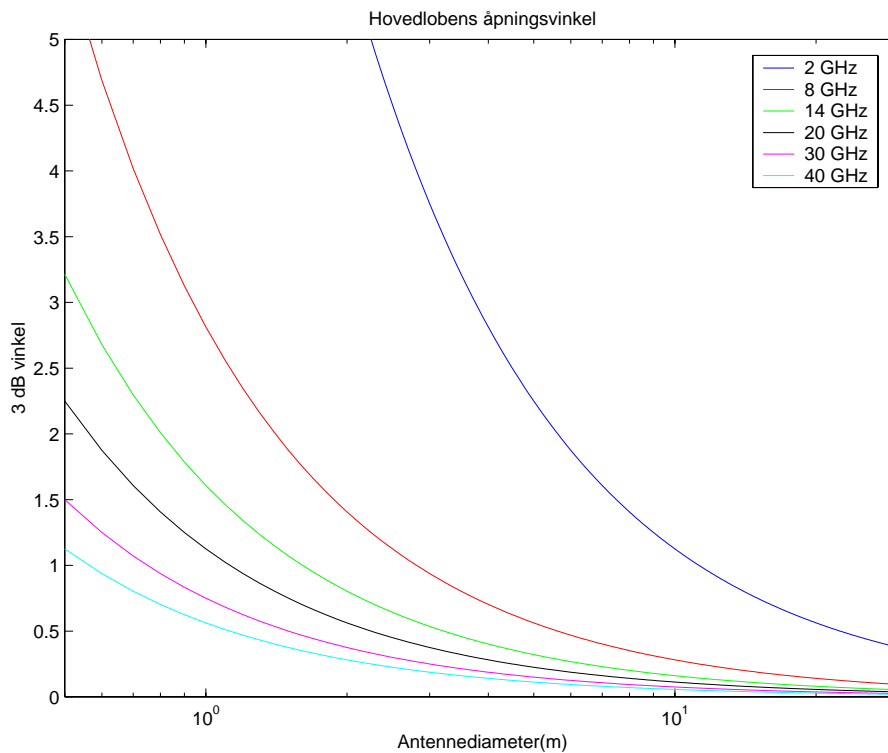
Her er  $\theta_{min}$  utenfor hovedloben og største verdien av  $1^\circ$  og  $100\lambda/D^\circ$  hvor  $\lambda$  er bølgelengden og  $D$  er antennediameteren. I tillegg anbefales det at 90% av sidelobenivået ikke skal overstige

$$G(\theta) = 29 - 25\log(\theta) \quad \text{for } 1^\circ \leq \theta \leq 20^\circ \quad \text{(dBi)} \quad (3-4)$$

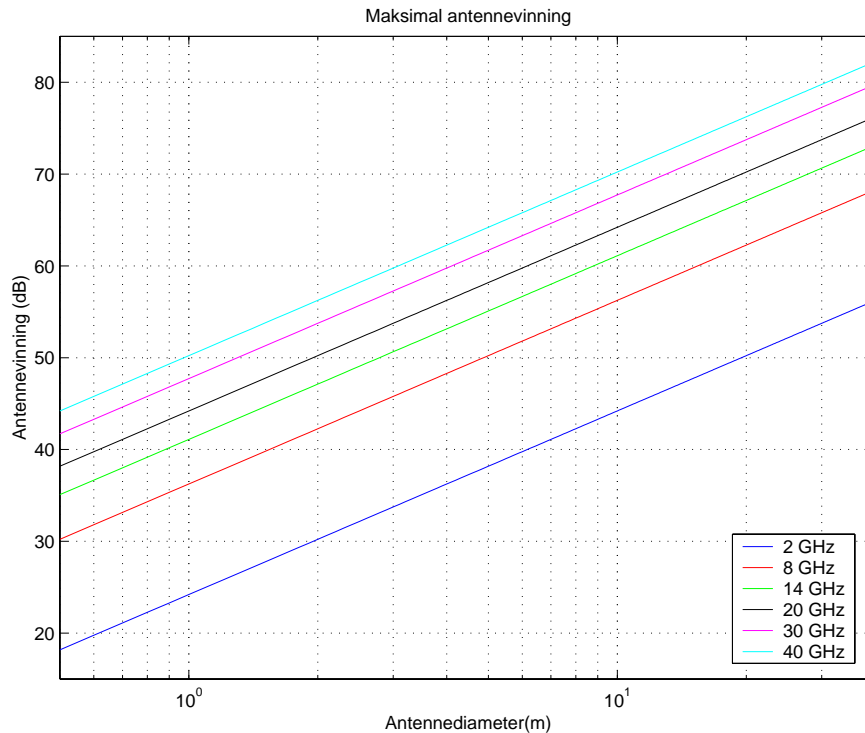
Dette gjelder overalt innenfor  $\pm 3^\circ$  vertikalt i satellittbanen og at forholdet  $D/\lambda > 50$ .



Figur 3.1  $\theta_{3dB}$  - hovedlobens 3dB åpningsvinkel

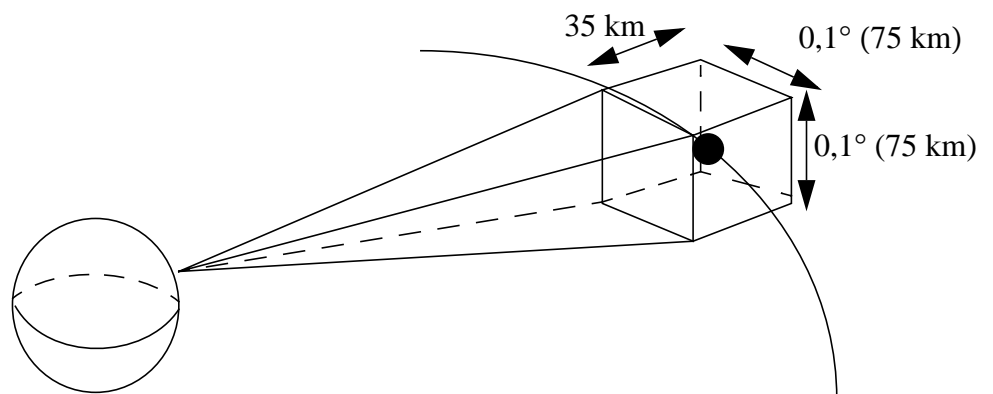


Figur 3.2 Åpningsvinkelen til hovedloben for forskjellige frekvenser og antennediametere



Figur 3.3 Antennevinning som funksjon av diameteren for forskjellige frekvenser med effektivitet 0,6.

For å kompensere for relativ endring av retning mellom satellitten og terminalen vil det i noen tilfeller være nødvendig med automatisk styring av antennen for at den hele tiden skal peke i riktig retning. I noen tilfeller er det terminalen som er i bevegelse mens i andre tilfeller er det satellitten som er i “relativ” bevegelse i forhold til posisjonen sett fra jorda. For terminaler med små antenner som ikke er i bevegelse under sending vil det ikke være nødvendig med styring fordi hovedloben er så bred at signalstyrken ikke endres merkbart når satellittens posisjon endres. Dette gjelder for GEO satellitter. For andre satellitter må det enten brukes en omnidireksjonal antenne eller så kreves en styrefunksjon for antenne-loben. Dette kan gjøres mekanisk eller elektrisk. Figur 3.4 viser en GEO satellitts vindu



Figur 3.4 En GEO satellitts vindu i banen.

i banen, dvs unøyaktigheten i posisjon som er tillatt. Det er vanlig at satellitten kan ha en



unøyaktighet i posisjonen på  $\pm 0,05^\circ$ . En satellitt sender ut et "beacon" signal som brukes for å rette inn en antenne mot satellitten. I henhold til (5), side 375 vil initiell pekefeil når antennen rettes inn etter beaconet være i størrelsesorden  $0,1 - 0,2\theta_{3\text{dB}}$ . Dersom en antenne har en åpningsvinkel på mer enn  $0,25^\circ$  vil alltid satellitten befinne seg innenfor 3dB vinkelen dersom lobens maksimalpunkt er rettet et sted i vinduet. I figur 3.2 er dette kurvene med med 3dB vinkelen mindre enn  $0,25^\circ$ . Som figuren viser vil det kun være store antenner som krever automatisk styring etter dette kriteriet. Et annet poeng er at antenner er utsatt for vind og at de derfor kan trenge stabilisering for å korrigere bevegelse i antennen som oppstår når det blåser. Dette gjør at mindre antenner også ofte trenger automatisk stabilisering.

#### 4 LINKBUDSJETT

I (3) (likning A-17, side 28) er det gitt et uttrykk for signal-støyforholdet til et signal:

$$\frac{C}{N} = EIRP \cdot \frac{1}{L_0} \cdot \frac{G_r}{T} \cdot \frac{1}{kB} \quad (4-1)$$

Her er  $C$  bæreølgeeffekten,  $N$  er støy,  $EIRP$  er produktet av antennevinning og effekt i senderen,  $T$  er støytemperaturen sett fra mottakeren,  $G_r$  er antennevinningen til mottakeren,  $k$  er Boltzmans konstant ( $1,38 \cdot 10^{-23}$  J/K),  $B$  er båndbredden og frittromstapet

$$L_0 = \left( \frac{4\pi r}{\lambda} \right)^2 \quad (4-2)$$

For digital kommunikasjon vil det være fornuftig å finne forholdet mellom energi pr bit ( $E_b$ ) og støytettheten ( $N_0$ ). Dersom  $R$  er dataraten vil sammenhengen mellom signal-støyforholdet og forholdet mellom  $E_b$  og  $N_0$  være:

$$\frac{E_b}{N_0} = \frac{C}{N} \cdot \frac{B}{R} \quad (4-3)$$

Ved å bruke Ligning (4-1) kan Ligning (4-3) nå skrives som

$$\frac{E_b}{N_0} = EIRP \cdot \frac{1}{L_0} \cdot \frac{G_r}{T} \cdot \frac{1}{k} \cdot \frac{1}{R} \quad (4-4)$$

Ved å utvide systemet og la  $L$  representere implementasjonstap, tap i mateledninger, dempning p g a nedbør, atmosfæriske forhold (f eks scintillasjon) o l, blir Ligning (4-4) utvidet til

$$\frac{E_b}{N_0} = EIRP \cdot \frac{1}{L_0} \cdot \frac{G_r}{T} \cdot \frac{1}{k} \cdot \frac{1}{R} \cdot \frac{1}{L} \quad (4-5)$$

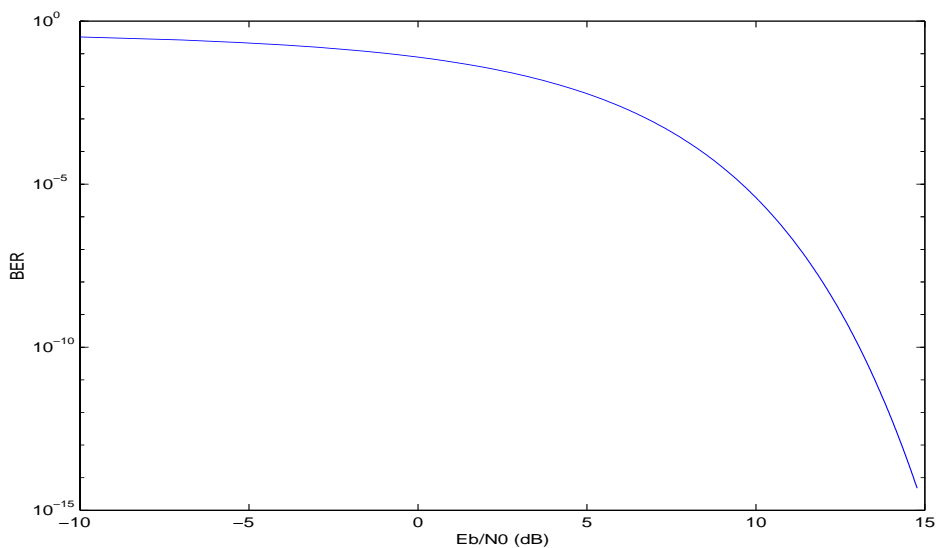
En konsekvens av Ligning (3-1) og Ligning (4-1) i Ligning (4-4) er at endring av frekvens ikke vil gi noen gevinst i linkbudsjettet fordi frekvensavhengighetene i uttrykkene opphever hverandre når  $EIRP$  anses som konstant.

For satellittkommunikasjon vil totalt signal - støyforhold  $((E_b/N_0)_{tot})$  på opp- og nedlink være gitt ved

$$\left(\frac{E_b}{N_0}\right)_{tot} = \frac{1}{\frac{1}{\left(\frac{E_b}{N_0}\right)_{ned}} + \frac{1}{\left(\frac{E_b}{N_0}\right)_{opp}} + \frac{1}{\left(\frac{E_b}{Im}\right)} + \frac{1}{\left(\frac{E_b}{I}\right)}} \quad (4-6)$$

hvor  $Im$  er effekttettheten i intermodulasjonsproduktene og  $I$  er effekttettheten i interferensen. Ligningen er hentet fra (4), side 58, 2. del. I forsterkerens lineære område vil intermodulasjonsproduktene være neglisjerbare noe som ofte ikke er tilfelle for satellittkommunikasjon. Interferens skyldes støy fra andre sendere enten tilsiktet eller utilsiktet. Ved jamming vil ofte interferens være den dominerende støyfaktoren.

Figur 4.1 viser bitfeilsannsynligheten som funksjon av  $E_b/N_0$  for BPSK, som er en vanlig brukt modulasjonsmetode. Bakgrunnen for figuren er vist i Appendiks B.



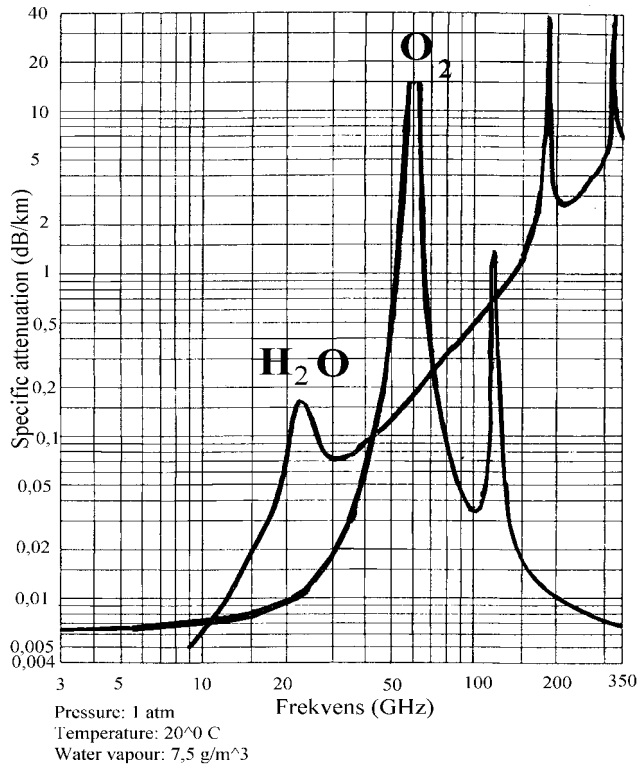
Figur 4.1 Bitfeilsannsynlighet (BER) for BPSK som funksjon av  $E_b/N_0$ .

#### 4.1 Dempning

Dette avsnittet omhandler signaldempning utenom frittromstapet. Aktuelle frekvenser vil være så høye at nedbørdempning og dempning p g a atmosfæriske forhold begynner å bli betydelige. Ved høye frekvenser vil også fri sikt være viktig. Vegetasjon vil ofte dempe signalet tilstrekkelig til at forbindelsen blir ødelagt. Antenneplassering vil derfor være veldig kritisk for å oppnå god forbindelse og tilgjengelighet.

#### 4.1.1 Atmosfæredempning

Radiosignaler i atmosfæren vil hovedsakelig dempes p g a absorpsjon i oksygen ( $O_2$ ) og vanddamp ( $H_2O$ ). Dempning som skyldes denne effekten er spesielt gjeldende for frekvenser over 10 GHz. Spesifikk dempning for  $O_2$  og  $H_2O$  er vist i Figur 4.2. For å finne



Figur 4.2 Spesifikk dempning p g a gasser i atmosfæren

dempning på grunn av absorpsjon i  $O_2$  og  $H_2O$  må ekvivalent distanse gjennom respektive media bestemmes. I (6) refereres det til CCIR hvor ekvivalent distanse er gitt ved

$$L_e = \frac{2h}{\sqrt{\sin^2(\epsilon) + \frac{2h}{R_{eff}} + \sin(\epsilon)}} \quad (4-7)$$

hvor  $R_{eff}$  er effektiv jordradius lik 8500 km,  $h$  er effektiv høyde for vanddamp ( $h_w = 2,2 - 2,5$  km i frekvensområdet 10 - 20 GHz,  $h_o = 6$  km for frekvenser under 50 GHz) og  $\epsilon$  er antennens elevasjonsvinkel som for GEO SATKOM er gitt i Appendiks A.1. Atmosfærisk dempning  $L$  blir da

$$L = \gamma_o \cdot L_{eo} + \gamma_w \cdot L_{ew} \quad (\text{dB}) \quad (4-8)$$

hvor  $L_{eo}$  er ekvivalent distanse gjennom  $O_2$ ,  $L_{ew}$  er ekvivalent distanse gjennom  $H_2O$  og  $\gamma_o$  og  $\gamma_w$  er spesifikk dempning for henholdsvis  $O_2$  og  $H_2O$  gitt i Figur 4.2.

#### 4.1.2 Troposfærisk scintillasjon

Amplitudescintillasjon er generert av brytningsindeksfluktuasjoner i den nedre delen av troposfæren (høyde < 1 km). Årsaken til at brytningsindeksen fluktuerer er store fuktighetsgradienter og temperaturinversjonslag, samt irregulareteter i trykket. For lave elevasjonsvinkler ved høye breddegrader med lite nedbør (f eks polare områder) vil amplitudescintillasjon være den dominerende propagasjonseffekten, forutsatt da at man har frisikt.

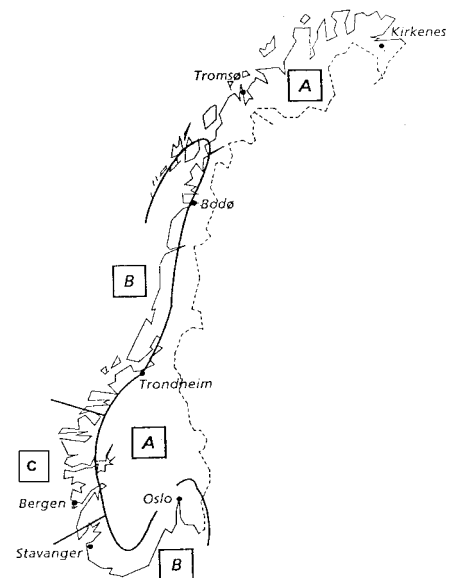
I (17)er det angitt noen figurer som viser scintillasjonsmålinger på Isfjord Radio på Svalbard ved 11,8 GHz. Her er elevasjonsvinkelen 3,2 grader og målingene ble gjort i Juli-August 1980. Tapet var her mer enn 3 dB 1% av tiden. Tilsvarende var tapet mer enn 8 dB 0.01% av tiden. Scintillasjonen avtar med økende elevasjonsvinkel, slik at tilsvarende målinger lenger syd i Norge antakelig ville vist mindre tap.

#### 4.1.3 Dempning på grunn av nedbør

Regndempning oppstår fordi regndråpene fører til absorpsjon og avbøyning av radiobølgene. Hvor stor dempningen er vil være avhengig av dråpeformen og regnintensiteten. Jorda deles inn i soner som gir en beskrivelse av forventet regnintensiteten i de forskjellige sonene i prosent av tiden gjennom et helt år. Norge deles ofte inn i tre slike soner. Disse er vist i Figur 4.3.

I Appendiks C er det gjengitt en metode anbefalt av ITU-R for å beregne regndempning i Norge. Resultatene er brukt i beregningene av kurvene gjengitt i forskjellige figurer dette avsnittet.

Figur 4.4 til Figur 4.7 viser forskjellige plot av regndempningen for forskjellige prosent av tiden ved forskjellige steder og klimasoner i Norge. Tabell 4.1



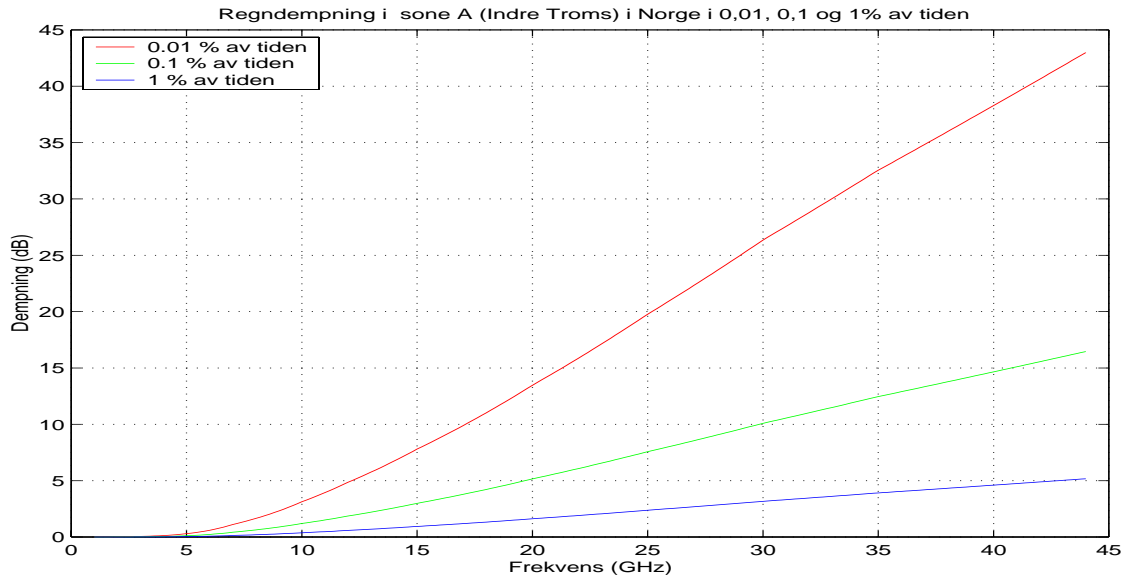
Figur 4.3 Klimasoner i Norge

Sted	Indre Troms	Eggemoen	Bergen	Lindesnes	Bodø
Klimasone	A	A	C	B	B
Posisjon	69°N/19°V	60,5°N/10°V	60,5°N/5°V	58°N/7°V	67,3°N/ 14,5°V
Elevasjon	11,1	20,8	21,2	23,7	13,4

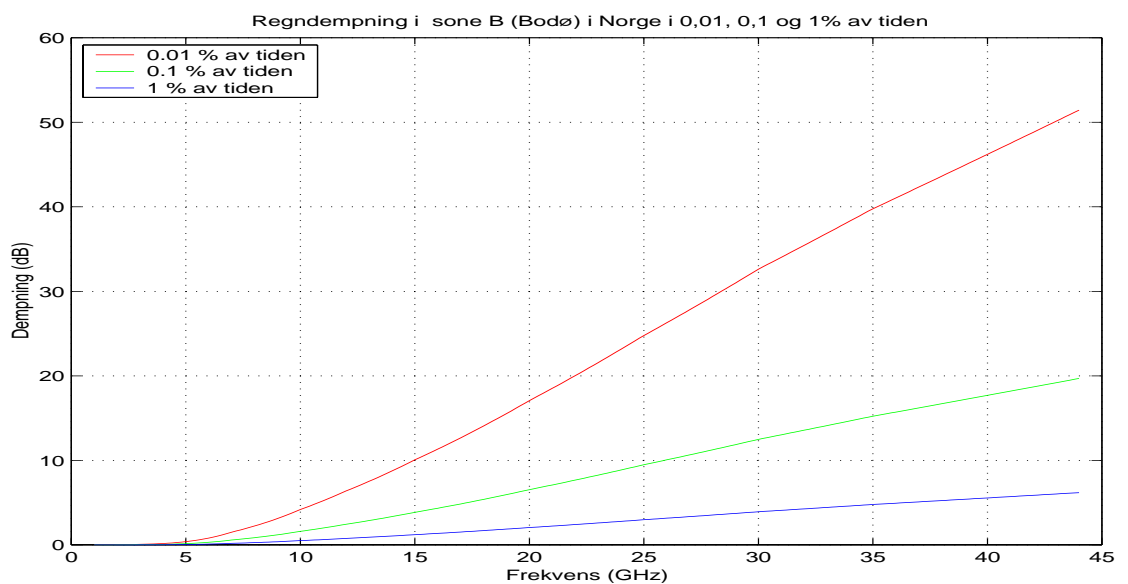
Tabell 4.1 Antennens elevasjonsvinkel forskjellige steder i Norge for GEO satellitt ved 1° W (Intelsat)

viser antennens elevasjonsvinkel ved de forskjellige stedene med pekeretning mot Intelsat satellitt på  $1^\circ$  vest. Kurvene er beregnet ut fra Ligning (C-12). Som det fremgår av figurene er regndempningen økende med økende frekvens.

Figur 4.4 til Figur 4.6 viser forventet regndempning som linkbudsjettet må tåle for å hin-

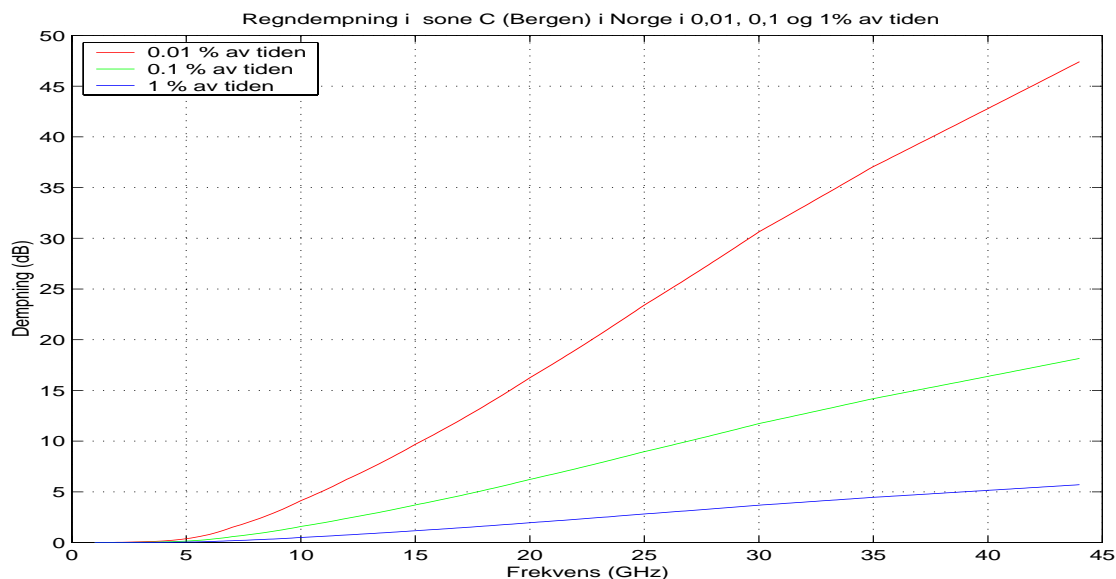


Figur 4.4 Figuren viser regndempning som gjelder for 0,01, 0,1 og 1 % av tiden i Indre Troms (sone A).



Figur 4.5 Figuren viser regndempning som gjelder for 0,01, 0,1 og 1% av tiden i Bodø (sone B).

dre tap av kommunikasjon i mer enn henholdsvis 0,01, 0,1 og 1% av tiden ved forskjellige steder i Norge. Ved frekvenser over 10 GHz må det beregnes en betydelig margin for å unngå mer enn 0,01%. I Ku båndet vil marginen være på 10 dB på opplink i sone C for å sikre kommunikasjon i 99,99% av tiden. For høyere frekvenser vil marginen bli enda større slik at det i praksis vil være vanskelig å sikre kommunikasjon i 99,99% av tiden. Det



Figur 4.6 Figuren viser regndempning som gjelder for 0,01, 0,1 og 1% av tiden i Bergen (sone C).

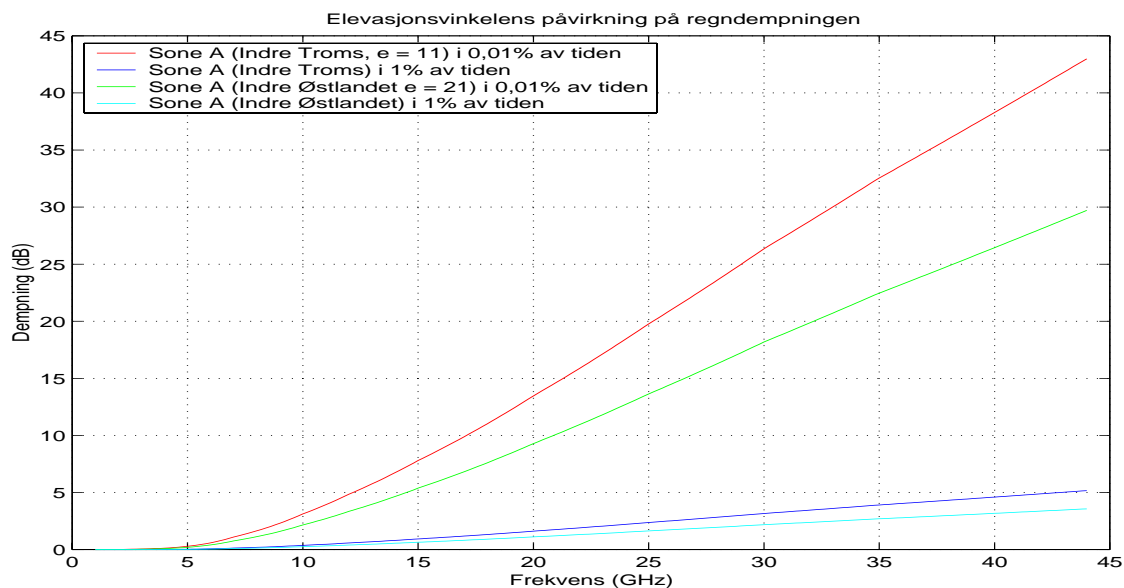
største problemet er nødvendigvis i de kraftigste regnskurene. Ved å akseptere tap av kommunikasjon under de verste forholdene kan systemet beregnes for kommunikasjon i 99% av tiden. Da bør det være mulig å kunne benytte frekvenser i både Ka og EHF båndet. Største regndempningsmargin ved 44 GHz vil da være i størrelsesorden 5 dB. I tillegg kommer også heving av støytemperaturen som skyldes temperaturen i regnskuren (se avsnitt 4.2).

Som det går fram av figurene er det merkbart forskjell i dempning mellom sone A og sone B og C. Mellom sone B og C er ikke forskjellen så stor. Største forskjellen er ved de høyeste frekvensene og ligger på rundt 15 dB når kravet til forbindelse er mer enn 99,99% av tiden. Ved å akseptere forbindelse i 99% av tiden vil ikke forskjellen være større enn omtrent 2 dB, eller mindre enn 50% i forskjell i mottatt effekt.

Figur 4.7 viser elevasjonsvinkelen innvirkning på dempningen. Siden distansen gjennom regnskuren øker når elevasjonsvinkelen blir liten, vil dempningen også være større ved lav elevasjonsvinkel.

SATKOM ved høye frekvenser vil være svært utsatt for kraftig regn. I Norge er det ikke så vanlig med kraftig nedbør slik at kommunikasjon kan opprettholdes opp mot 99% av tiden gjennom et helt år uten å måtte beregne urealistisk stor margin selv ved frekvenser i EHF båndet.

I (5), side 55 står det at tørr snø har liten innvirkning på de elektromagnetiske bølgenes våt snø/sludd kan være et vel så stort problem som regn. Det nevnes også at oppsamling av snø og is i reflektoren på antennen kan være et større problem enn selve snøfallet.



Figur 4.7 Figuren viser elevasjonsvinkelens innvirkning på regndempning.

#### 4.1.4 Vegetasjonsdempning

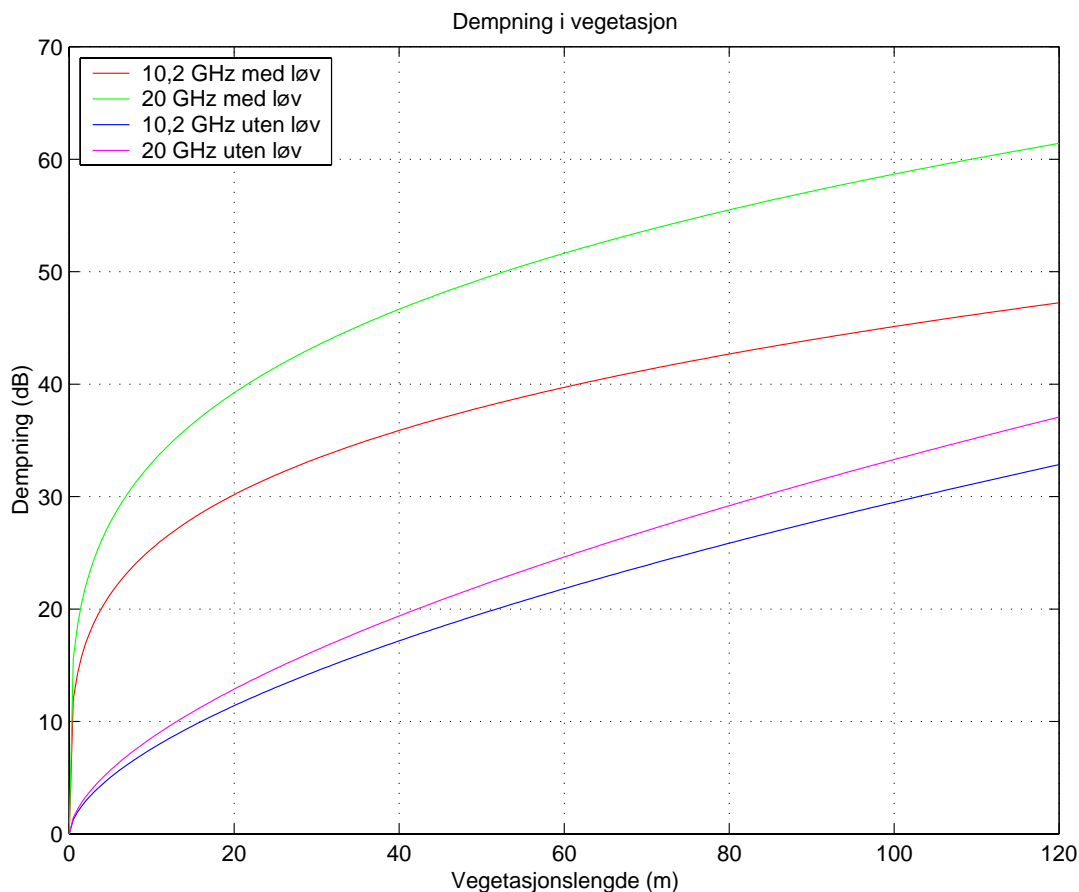
For brukere som ikke alltid kan planlegge hvor en terminal skal stå, vil ofte problemer med demping i vegetasjon være avgjørende for om det er mulig å bruke kommunikasjonsutstyret.

Vegetasjon er veldig varierende fra sted til sted fra spredte trær til tett skog med eller uten løv. Den sikreste måten å identifisere hvor stor dempingen på et sted vil være, er å gjøre målinger. Dette er ofte tidkrevende og det er derfor viktig å finne modeller som er gode nok under forskjellige forhold. I referanse (9) har forfatterne sammenlignet noen modeller med målinger foretatt ved 10,2 og 20 GHz for forskjellige tilfeller med og uten løv hvor trærne var plantet med samme mellomrom. Ingen av modellene stemmer helt med alle målingene. En modell (fitted ITU-R model - FITU-R) var nær de målte dataene i mange tilfeller. Formlene for dempingen  $A_v$  i modellen med og uten løv er som følger:

$$A_v = 0.39 f^{0.39} d^{0.25} \quad \text{med løv} \quad (4-9)$$

$$A_v = 0.37 f^{0.18} d^{0.59} \quad \text{uten løv} \quad (4-10)$$

Her er  $f$  frekvensen i MHz og  $d$  distanse i vegetasjon i meter. Konstantene er basert på tilpassning ved flere målinger. Figur 4.8 viser kurver for dempingen i vegetasjon basert på Ligningene (4-9) og (4-10). Selv om det er store variasjoner mellom verdiene i målingene og verdiene som modellen gir, er det likevel viktig å merke seg at ved disse frekvensene vil selv små hindringer i vegetasjon gi store dempninger i signalet og konsekvensen blir tap av kommunikasjon. Kurvene vil nok i realiteten variere en del avhengig av tettheten i vegetasjonen og for de verste tilfellene vil resultatet være dårligere enn det som er vist her.



Figur 4.8 Dempning i vegetasjon med og uten løv ved 20 og 10,2 GHz.

En må ta i betraktning at elevasjonsvinkelen  $\epsilon$  får innvirkning også her. Vegetasjonsdempningen vil være avhengig av lengden  $l$  som signalet går gjennom mediet. Med tykkelsen  $t$  på mediet har vi sammenhengen

$$l = \frac{t}{\tan \epsilon} \quad (4-11)$$

Det vil si at lengden  $l$  mer en dobles når elevasjonsvinkelen  $\epsilon$  endres fra  $20^\circ$  (Sør-Norge) til  $10^\circ$  (Nord-Norge). Derfor vil slik demping være et betydelig større problem i Nord-Norge.

#### 4.1.5 Diffraksjonstap ved satellittkommunikasjon

Ved bruk av geostasjonære satellitter og høye frekvenser får man lett problemer med diffraksjon. Det er forholdsvis enkelt å beregne diffraksjonstapet hvis man tenker seg en idealisert virkelighet der en "knivsegg" stikker høyden  $h$  opp over Line Of Sight (LOS) mellom sender og mottaker ( se Figur 4.9). Diffraksjonstap er ofte uttrykt ved hjelp av den dimensjonsløse parameteren

$$v = 2 \sqrt{\frac{\Delta d}{\lambda}} \quad (4-12)$$



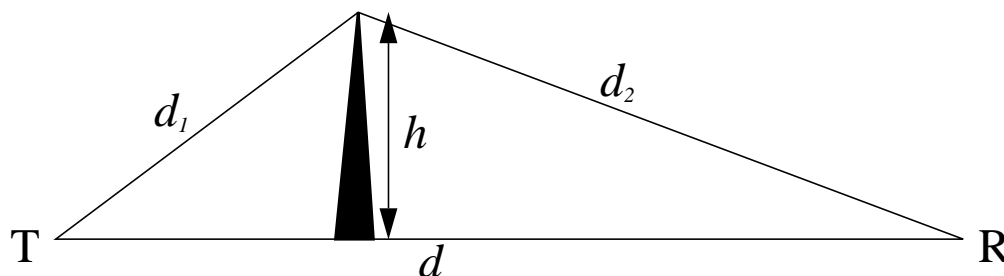
der  $\lambda$  er bølgelengden, og

$$\Delta d = d - (d_1 + d_2) \quad (4-13)$$

$d$ ,  $d_1$  og  $d_2$  er lengder som vist i Figur 4.9. En god approksimasjon til diffraksjonstapet i dB kan da beregnes ut fra følgende likning hentet fra (12):

$$J(v) = 6.9 + 20 \log[\sqrt{v^2 + 1} + v], \quad v > -0.7 \quad (4-14)$$

Beregninger av diffraksjonstapet for  $\Delta d \in [0,25]$  er vist i Figur 4.10.

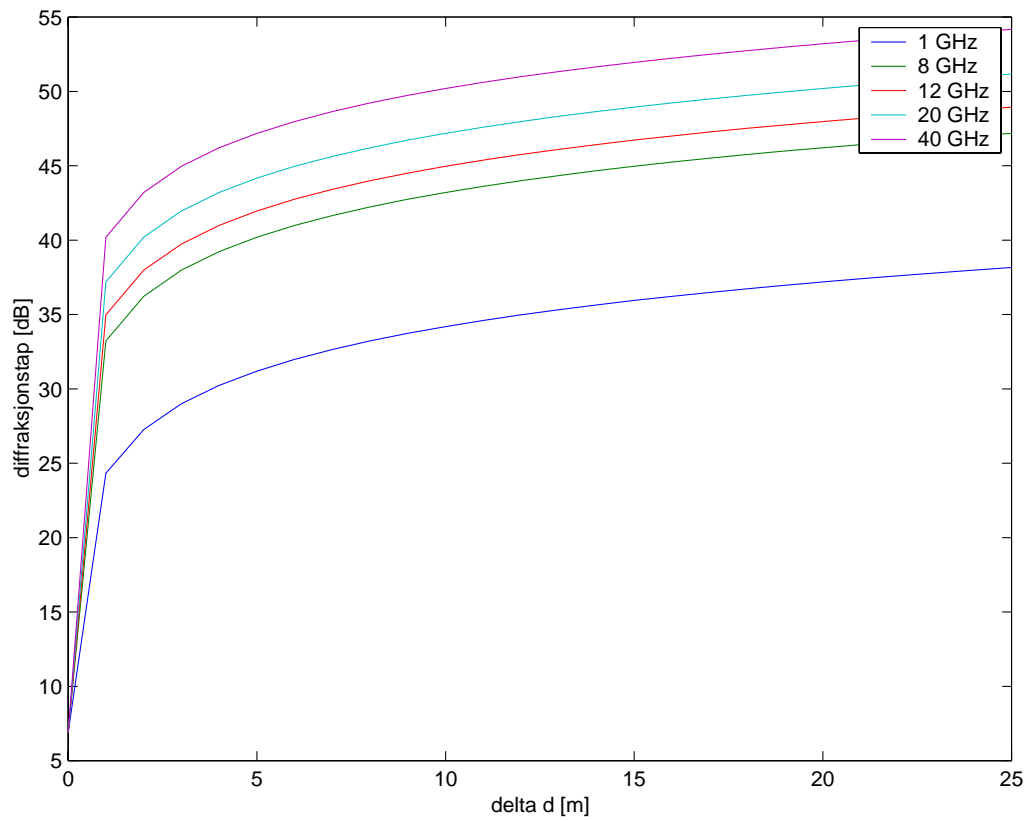


Figur 4.9 Illustrasjon av en “knivsegg” som stikker høyden  $h$  opp over LOS mellom en sender  $T$  og en mottaker  $R$

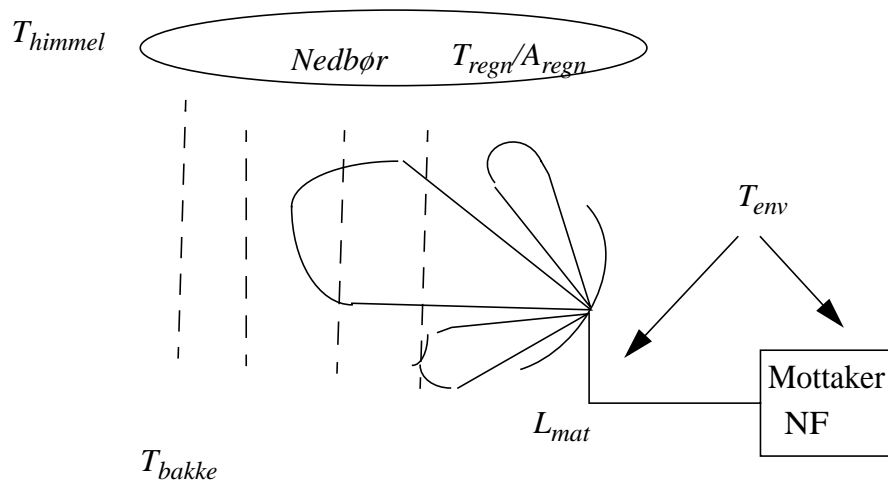
En ser at med de aktuelle frekvensene blir man fullstendig avhengig av friskt til satellitten. Dette gjør at man lett vil få problemer med satellittskygge i områder med høye fjell, som i Nord-Norge og på Nordvestlandet. Generelt blir dette problemet større jo lengre nord man kommer fordi elevasjonsvinkelen blir mindre. Som et lite eksempel kan en si at ved en elevasjonsvinkel på 10 grader (Nord-Norge) vil et fjell på 500 m gi en skygge som strekker seg omtrent 3 km bak fjellet. I figur 4.11 er det vist et kartutsnitt fra Bardufoss-området hvor satellittskyggen (svarte felter) er angitt når Intelsat 707 på  $1^\circ\text{W}$  benyttes. Denne satellitten er nærmere beskrevet i Appendiks E. Man ser at det er store områder bak høye fjell og i dype daler hvor det vil være umulig å få dekning ved bruk av geostasjonære satellitter. Dette vil være et stort problem flere steder i Norge fordi eksisterende infrastruktur finnes i dalbunnen. Flere kartutsnitt er vist i Appendiks F.

## 4.2 Terminalens støytemperatur

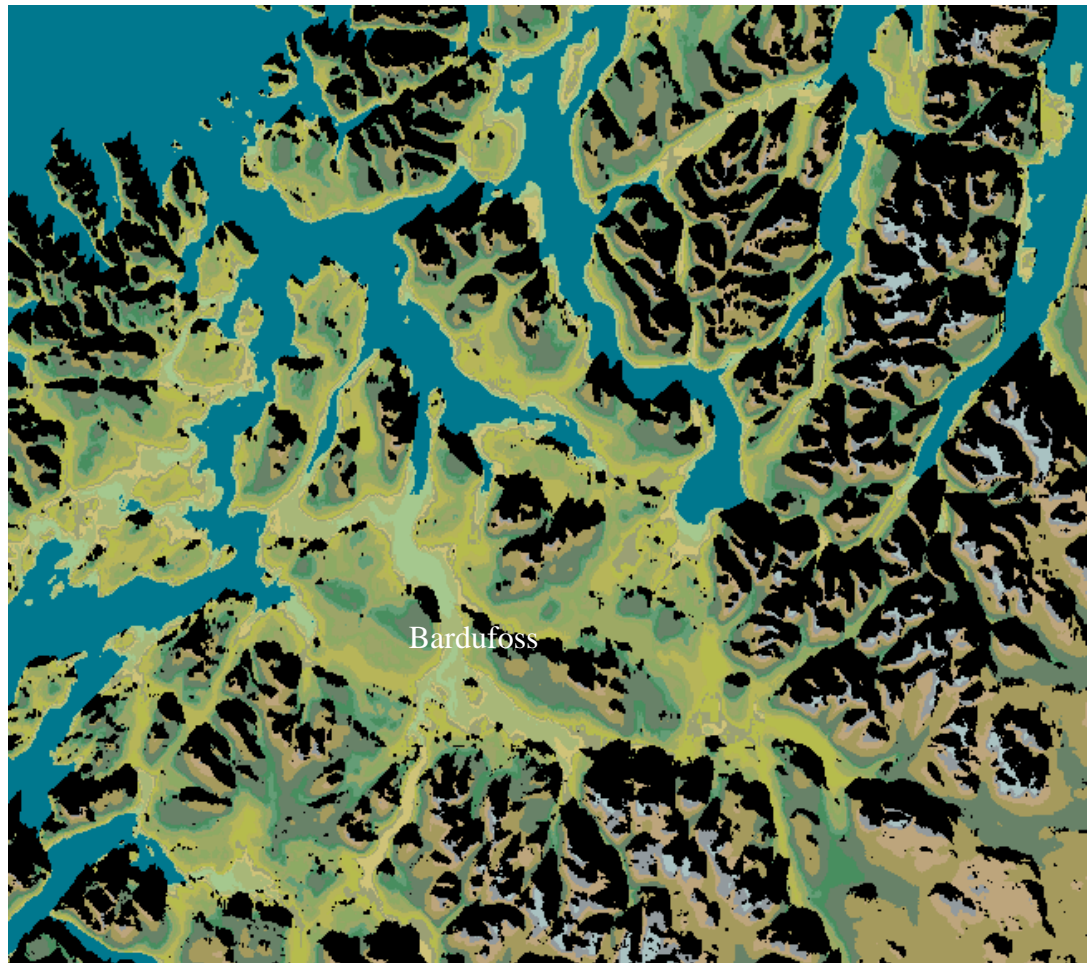
Det finnes flere kilder til støy. De viktigste faktorene som bestemmer hvor mye støy som degraderer signalet (systemstøyen) er antennens støytemperatur, mottakerens egenstøy (ofte gitt ved støyfaktoren  $NF$ ) og støy i forbindelser mellom komponentene. Dempningen i de forskjellige leddene i transmisjonskjeden er også medvirkende til støytemperaturen. Dette er illustrert i figur 4.12.



Figur 4.10 Kurver som viser diffraksjonstapet som funksjon av  $\Delta d$  for aktuelle frekvenser mellom 1GHz og 40GHz.



Figur 4.12 Systemstøytemperatur til en radiomottaker



Figur 4.11 Dekningsdiagrammet viser fjellskyggen (svarte felt) i Indre Troms ved bruk av GEO satellitt på 1°W.

Systemstøytemperaturen ( $T_s$ ) referert til inngangen på mottakeren er gitt ved

$$T_s = \frac{T_a}{10^{\frac{L_{mat}}{10}}} + T_{env} \left( 1 - 10^{-\frac{L_{mat}}{10}} \right) + T_{env} \left( 10^{\frac{NF}{10}} - 1 \right) \quad (4-15)$$

hvor  $T_{env}$  er omgivelsestemperaturen som vanligvis er omtrent 290K og  $L_{mat}$  er tap i mateledning mellom antennen og forforsterkeren. Mottakerens egen støytemperatur  $T$  er ofte gitt av støyfaktoren  $NF$  som er definert som følger:

$$NF = 1 + \frac{T}{290} \quad (4-16)$$

$NF$  er vanligvis gitt i dB og er da definert ved

$$NF = 10 \log \left( 1 + \frac{T}{290} \right) \text{ (dB)}$$

Det er viktig å redusere  $T_s$  mest mulig for å oppnå best mulig mottakerforhold fordi støytemperaturen reduserer  $C/N$  i Ligning (4-1). I Ligning (4-15) kan dette gjøres ved å velge løsninger som begrenser  $L_{mat}$  og NF mest mulig. Dette gjøres ved å plassere lavstøyforsterkeren (LNA) så nær antennen som mulig. En konsekvens av Ligning (4-15) utvidet for også å gjelde de forskjellige delene i en mottaker vil vise at LNAen (det første trinnet etter antennen) er kritisk for resten av mottakeren fordi det er viktig å forsterke signalet tidlig med minst mulig bidrag av støy. En LNA er en forsterker utviklet med tanke på minst mulig egenstøy.

Antennens støytemperatur ( $T_a$ ) er i klart vær:

$$T_{A,klart} = T_{himmel} + T_{bakke} \quad (4-17)$$

Denne støytemperaturen øker i overskyet vær. Meteorologiske formasjoner vil utgjøre både et absorberende og et emitterende medium. En del av bakgrunnsstrålingen fra verdensrommet vil bli absorbert, samtidig som skylaget og evt regnet genererer termisk støy. I overskyet vær blir støytemperaturen:

$$T_{A,overskyet} = T_{himmel}/A_{regn} + T_m(1 - 1/A_{regn}) + T_{bakke} \quad (4-18)$$

$A_{regn}$  er her dempningen gjennom regnet/skyen.  $T_m$  er gjennomsnittlig termodynamisk temperatur til skyen. Det er vanlig å bruke  $T_m = 275K$ .

I (5), side 45 er det et eksempel som viser at ved 12 GHz vil økningen i støytemperaturen på grunn av regn være omlag 180K.

### 4.3 Transponder “back off” og intermodulasjon

Intermodulasjonsprodukter (IM) genereres når et signal går gjennom en ulineær forsterker. IM vil si at det genereres komponenter av signalet ved andre frekvenser enn den opprinnelige og som skyldes høyere ordens ledd i forsterkerkarakteristikken  $H(x)$ . IM vil virke som støy og vil dermed forstyrre signaler med frekvens som faller sammen med IM produktene. En ulineær forsterker med inngangssignal  $x(t)$  og utgangssignal  $y(t)$  kan ofte uttrykkes som en potensrekke

$$y(t) = H(x(t)) = \sum_{i=0}^I \alpha_i(x(t))^i \quad (4-19)$$

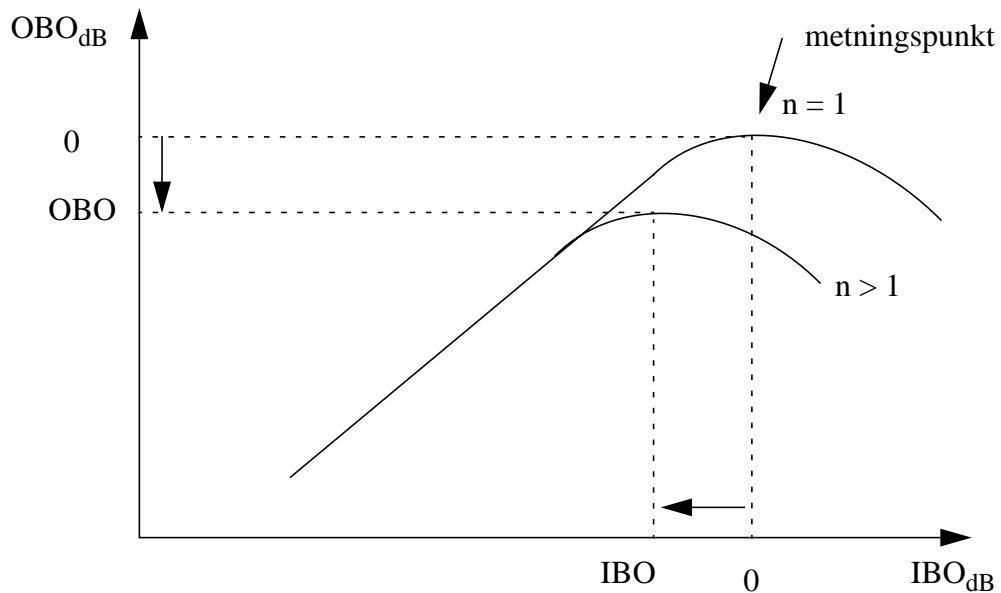
hvor  $\alpha_i$  er koefisienter som uttrykker produktets størrelse. Et signal  $x(t)$  på formen

$$x(t) = \sum_{j=1}^J \beta_j \cos(\omega_j t + \theta_j(t)) \quad (4-20)$$

kan beskrive  $J$  bærebølger på inngangen til en transponder. For eksempel vil senterfrekvensene til produktene som dannes med  $i = 3$  fra Ligning (4-19) og  $J = 2$  fra Ligning (4-20) finnes fra følgende uttrykk:

$$\begin{aligned}
 y(t) &= \alpha_3 (\beta_1 \cos(\omega_1 t) + \beta_2 \cos(\omega_2 t))^3 \\
 &= \alpha_3 \sum_{i=0}^3 (\beta_1^{3-i} \beta_2^i \cos^{3-i}(\omega_1 t) \cos^i(\omega_2 t))
 \end{aligned}
 \tag{4-21}$$

Mulige frekvenser  $\omega$  vil være  $\omega \in \{3\omega_1, 2\omega_1 \pm \omega_2, \omega_1 \pm 2\omega_2, 3\omega_3\}$ . Her vil komponentene ved  $2\omega_1 - \omega_2$  og  $2\omega_1 + \omega_2$  kunne interferere med andre signal fordi de havner innenfor båndbredden til transponderen. Det er derfor viktig å begrense ulineariteten i et system med flere bærebølger som for eksempel ved FDMA til et nivå hvor IM produktene ikke gir uakseptable mottakerforhold. Dette gjøres ved å tilpasse inngangsnivået slik at transponderen opererer i det lineære området.



Figur 4.13 Transponderkarakteristikk for en av  $n$  bærebølger (multicarrier)

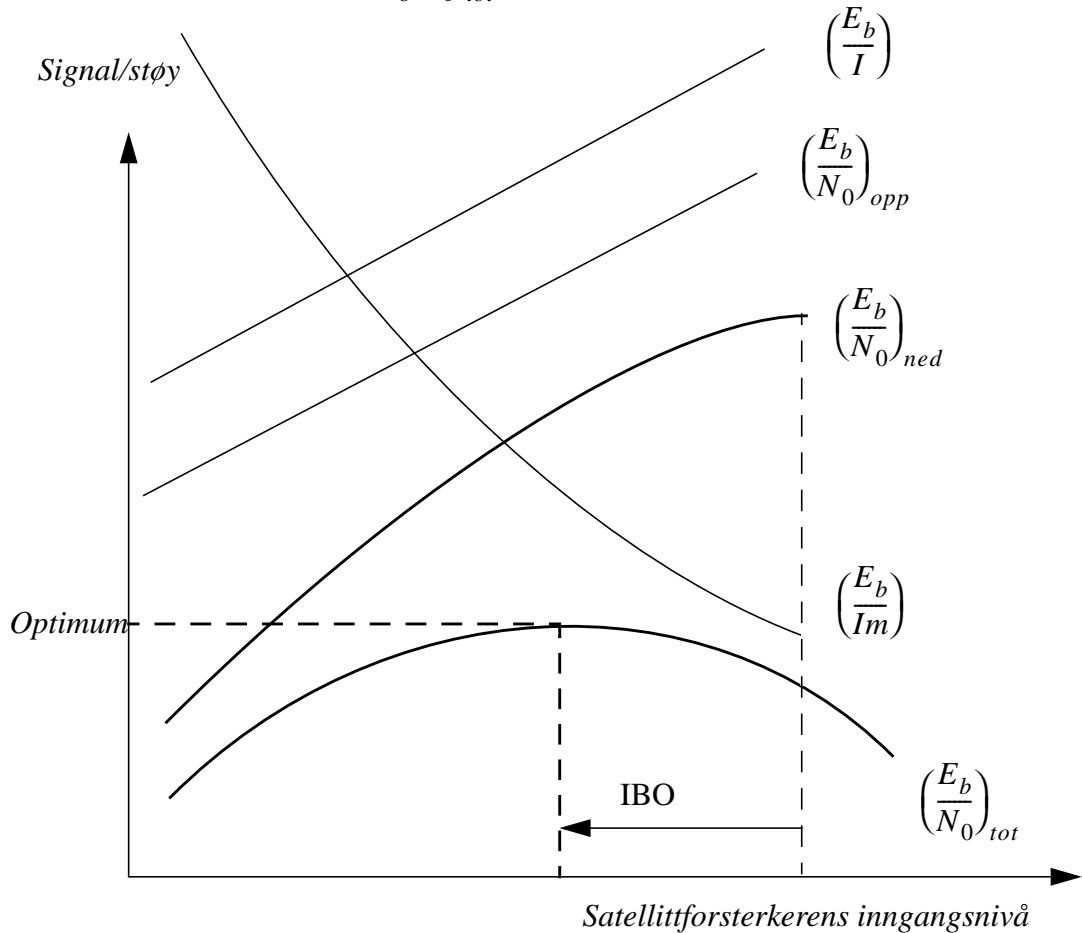
Figur 4.13 viser typisk forsterkerkarakteristikk hvor forsterkeren er lineær for signaler opp til et visst nivå og ikke det genereres IM produkter. Når signalnivået økes vil transponderen komme inn i det ulineære området hvor det genereres IM produkter. Her vil forsterkningen reduseres og nivået vil etter hvert nå sitt maksimum (forsterkeren er i metning). Etter dette vil ytterligere økning av inngangsnivået føre til en reduksjon i utgangsnivå fordi effekten i IM produktene blir større. Reduksjonen i signalnivå i forhold til metningspunktet kalles "back off". Reduksjonen på inngangen (input back off - IBO) fører til en reduksjon i signalnivå på utgangen (output back off - OBO). IBO og OBO defineres ved

$$IBO = \frac{P_{inn, bb}}{P_{inn, metn}} \quad \text{og} \quad OBO = \frac{P_{ut, bb}}{P_{ut, metn}}
 \tag{4-22}$$

hvor  $P_{inn, metn}$  er inngangseffekten som setter forsterkeren i metning med kun en bærebølge og  $P_{ut, metn}$  er utgangseffekten i dette punktet,  $P_{inn, bb}$  er inngangseffekten til en bærebølge av flere og  $P_{ut, bb}$  er utgangseffekten til denne bærebølgen.

#### 4.3.1 Beregning av optimalt signalnivå

Ligning (4-6) viser at totalt signal-støy forhold er avhengig av fire faktorer; signal-støy på opplink  $(E_b/N_0)_{opp}$ , signal-støy forhold på nedlink  $(E_b/N_0)_{ned}$ , intermodulasjon  $(E_b/Im)$  og interferens  $(E_b/I)$ . Figur 4.14 illustrerer resultatet av Ligning (4-6) med kurvene som funksjon av satellittforsterkerens inngangsnivå. Optimalt signalnivå vil være maksimalpunktet for totalt signal-støy forhold  $(E_b/N_0)_{tot}$ .



Figur 4.14 Bidrag til totalt signal - støy forhold  $(E_b/N_0)_{tot}$

For eksempel vil en kanal på henholdsvis 64 kbit/s og 512 kbit/s resultere i OBO gitt i tabell 4.2 og beskrives av følgende uttrykk:

$$OBO = 10 \log \left( \frac{1}{\text{antall kanaler}} \right) \quad (4-23)$$

Forutsetningene for tabell 4.2 er QPSK modulasjon (1,4 bit/s/Hz), 1/2 rate koding og det er sett bort fra IM og interferens. OBO vil normalt være større ved flerkanals transmisjon

Frekvens	L	C	X	Ku	Ka	EHF
Transponder båndbredde	3 MHz <sup>a</sup>	36 MHz	40 MHz	36 MHz	165 MHz ACTS	50 MHz
OBO for 64 kbit/s kanal (91 kHz/kanal)	-15,7 dB	-26 dB	-26,4 dB	-26 dB	-32,6 dB	-27,4 dB
OBO for 512 kbit/s kanal (731 kHz)	N/A	-17dB	-17,4 dB	-17 dB	-23,5 dB	-18,4 dB

Tabell 4.2 Ekvivalent OBO for en kanal ved flerkanals transmisjon

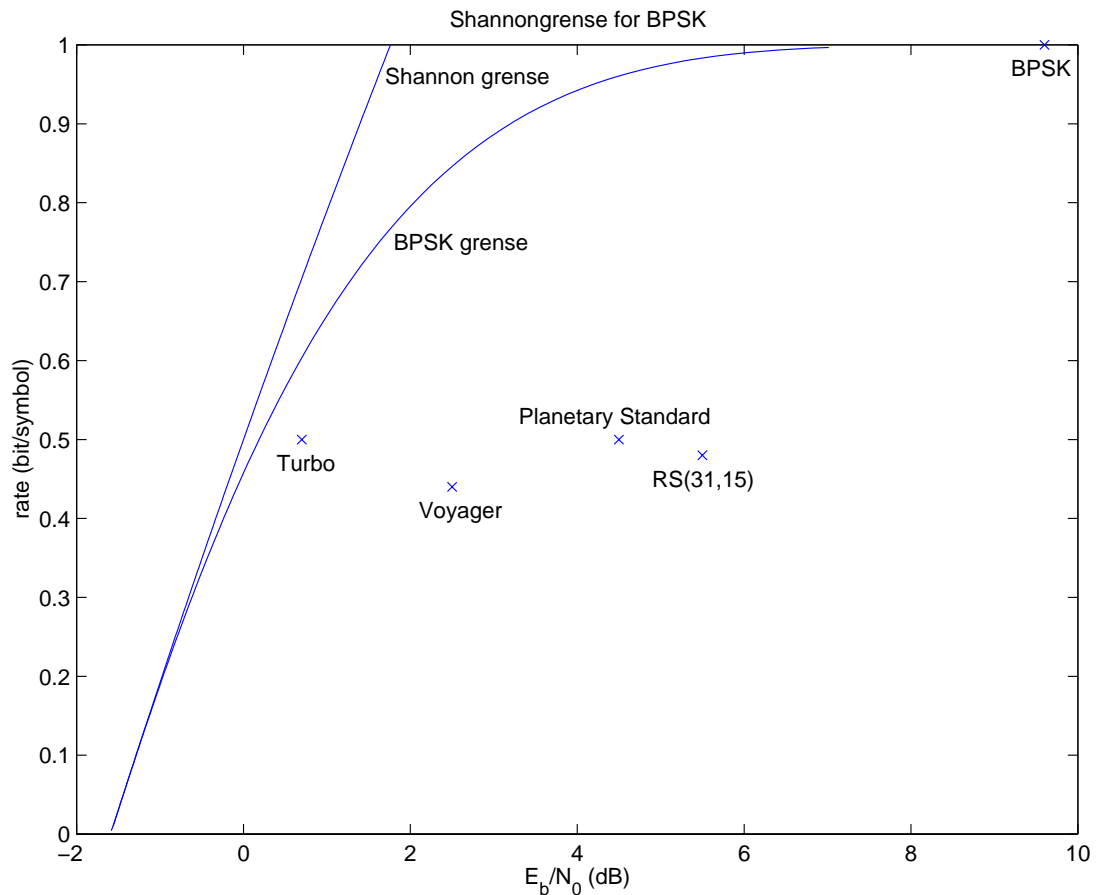
a. En Inmarsat 2 transponder støtter 250 Inmarsat A forbindelser (9,6 kbit/s)

fordi det vil alltid oppstå IM produkter som vil redusere utnyttelsen av transponderen.

#### 4.4 Feilkorrigerende koding

Feilkorrigerende koding går ut på å “omstrukturere” en datasekvens blant annet ved å legge inn redundante bit. Disse bitene kan så bli brukt til å detektere og korrigere feil som har oppstått på grunn av forskjellig type støy og jamming. Målet med feilkorrigerende koding er å redusere feilsannsynligheten,  $P_B$ , og/eller signalstyrken,  $E_b/N_0$ , på bekostning av økt båndbreddebehov og kompleksitet. Shannon-grensen (13) angir en teoretisk grense for hvor god det er mulig å få ytelsen til en koder når kanalen blir utsatt for hvit støy. I figur 4.15 er denne angitt, sammen med den teoretiske grensen for ytelsen ved bruk av BPSK-modulasjon. Her er det også angitt noen vanlige feilkorrigerende koder som viser hvor stor gevinst man har ved slike koder. Punktene som er angitt er for feilrater på  $10^{-5}$ . Spesielt Turbo koden (16) har vist seg å ha gode feilkorrigerende egenskaper. Ved å halvere raten i forhold til ukodet data, oppnår man en gevinst på ca 9dB. Ulempen ved Turbo koden er at den har forholdsvis lang dekodingsforsinkelse.

Hvis kanalen varierer mye kan adaptiv koding være en god løsning. Det vil si at ved liten dempning av signalet kan en høyrate koder benyttes. Hvis det derimot er stor dempning av signalet, kan en lavratekoder benyttes. Denne gir lavere throughput, men har bedre feilkorrigerende egenskaper.



Figur 4.15 Grenser for ytelsen til forskjellige kodere under påvirkning av hvit støy.

## 5 BRUKSOMRÅDER FOR SATKOM

I dette kapitlet sammenlignes dagens løsninger på noen kommunikasjonsbehov med en mulig SATKOM løsning. Disse behovene er

- Samband lang rekkevidde (SBLR) i forbindelse med virksomhet på dypet (VPD)
- TADKOM forbindelse via satellitt
- Reservesamband ved brudd i FDN

SATKOM kan være alternativ til noen av dagens kommunikasjonsbehov i Forsvaret der eksisterende løsninger ikke strekker til. Dette gjelder spesielt i tilfeller hvor det ikke er etablert kommunikasjon på forhånd og når "vanlig" radiokommunikasjon ikke når fram.

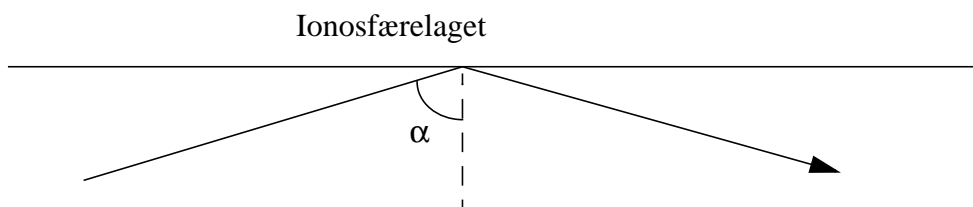
De forskjellige bruksområdene vil gjenspeile forskjellige krav til kapasitet og mobilitet som igjen gir krav til vekt og størrelse. I ene ytterkant kommer små bærbar terminaler for SBLR og i den andre enden store jordstasjoner for reserveforbindelse i FDN.



## 5.1 Radiokommunikasjon for SBLR

Høyfrekvens (HF) radioer blir i dag brukt som sambandsmiddel i forbindelse med virksomhet på dypet (VPD) og kommunikasjon over store avstander. Hærens Jegerkommando anskaffer nye HF-radioer som er bedre enn de gamle HF-1 radioene, men det er fremdeles en del svakheter med disse radioene. Den kanskje største ulempen er at kapasiteten og tilgjengeligheten er forholdsvis dårlig (se (11)).

HF-bølgene kan forplante seg over store avstander ved at de reflekteres i ionosfæren, men transmisjonskapasiteten til denne kanalen kan være svært varierende. Både båndbredde, signaleffekt og støy vil være avhengig av geografisk posisjon, tidspunkt på døgnet og på året, solaktivitet og frekvens (10). For å få refleksjon må ikke innfallsvinkelen til ionosfærelaget definert i figur 5.1 være for liten. Dette gjør at det er vanskelig å sende over korte avstander med ionosfærepropagasjon.



Figur 5.1 HF-signalets innfallsvinkel  $\alpha$  til ionosfærelaget

HF-bølgene kan også propageres ved hjelp av rombølgen eller jordbølgen. Rombølgen på HF er den bølgen som utbrer seg i det frie rom mellom to antenner som ligger synlig til for hverandre. Denne typen bølgeutbredelse på HF har en større båndbredde enn ionosfærebølgen. Jordbølgen på HF derimot brer seg langs bakken, og går lengre enn synsrekkevidden. Dekningen er avhengig av frekvens, utsendt effekt, polarisasjon av radiobølgene, konduktiviteten til mediet som radiobølgene går i og type terreng. Rom- og jordbølgen har kortere rekkevidde enn ionosfærebølgen.

For høye frekvenser vil det oppstå et gap mellom det området hvor det er dekning med rom- eller jordbølgen, og det området hvor det er dekning med ionosfærebølgen. Det kan da bli vanskelig å få dekning i det området som gapet dekker, selv om man kan justere litt på dette ved å endre frekvens. De nye HF-radioene gjør valg og tildeling av frekvens enklere enn det var med de gamle fordi prosessen er automatisert. Dette medfører også at opetiden for sambandet blir lengre.

En typisk avtand for et jegersamband er 50-100 km og maksimalt 200 km. Dette er en forholdsvis kort avstand med tanke på ionosfærepropagasjon. Hvis man ikke når frem med rom- eller jordbølgen er en mulighet å benytte seg av et fjerntliggende rele. Ulempene ved dette er imidlertid at en usikker kanal brukes to ganger, og at redundansen svekkes, fordi man da er avhengig av releet. Dessuten krever releer ekstra ressurser for å bli plassert ut. Dette er ikke ønskelig i forbindelse med VPD.

Når det gjelder ionosfærebølgen, er det generelt dårlige forhold for dette i Nord-Norge. Dette fordi ioniserte partikler fra sola/magnetosfæren kommer inn over polene og gjør at HF-kanalen blir dårligere. Typisk er lave signal-støy forhold pga absorpsjon og høy doppler- og flerbanespredning.

En annen svakhet med HF-radioer er at de krever forholdsvis store antenner. Antennene bør i hvertfall være en halv bølgelengde. Ved 30 MHz er bølgelengden 10m mens den ved 3 MHz vil være 100m. Dette gir en stor og tungvint antenne. Det benyttes også ofte kortere piskantener med dårligere ytelse. Det er viktig å velge riktig antenntype, noe som krever både kunnskap og erfaring.

SATKOM er et mulig alternativ til HF kommunikasjon. Både når det gjelder kapasitet og betjening av antennen vil SATKOM være bedre og enklere enn HF. Antennens størrelse på en bærbar satellitterminal må av praktiske årsaker være liten med den fordel at antennen blir enkel å rette inn (mot en GEO satellitt). Ulempen er at antennevinnningen blir liten. Siden effekten i terminalen også er begrenset betyr dette begrenset kapasitet. SATKOM kan også løse kommunikasjon mellom de forskjellige enhetene på dypet.

Når det gjelder tilgjengeligheten viste figur 4.11 og figurene i Appendiks F at det også med SATKOM kan være dårlig forbindelse flere steder i Norge.

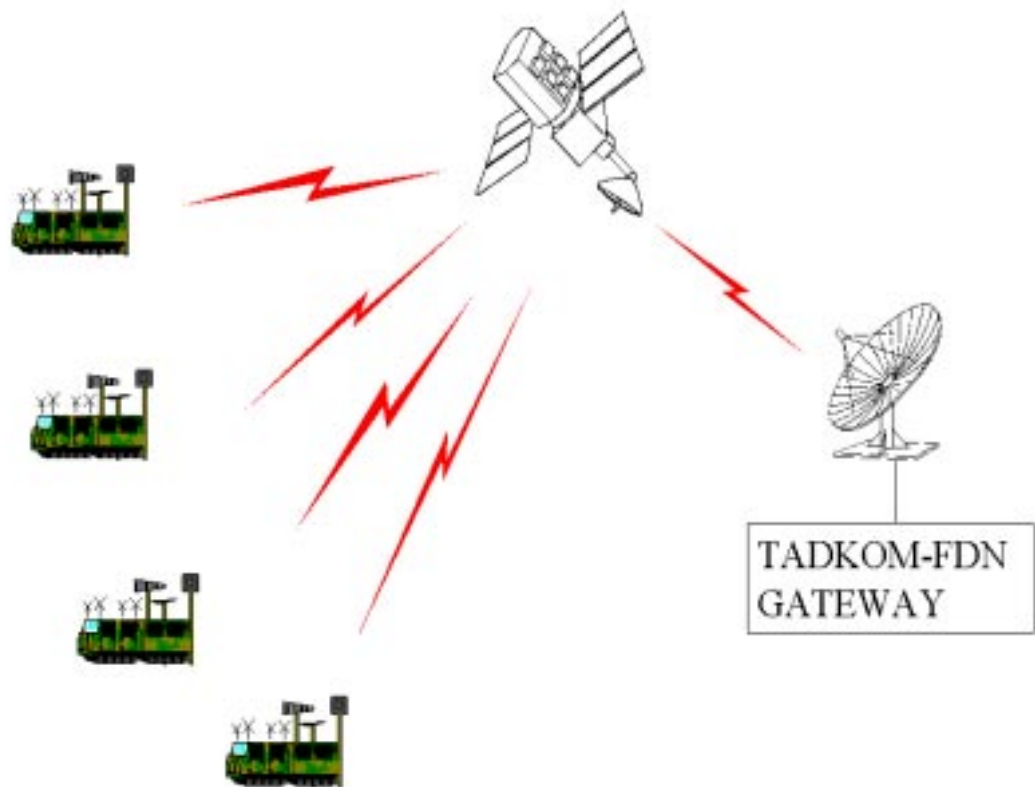
## 5.2 TADKOM trunkforbindelse

En multikanal forbindelse mellom TADKOM-noder har i dag kapasitet på 512 kbit/s og løses som regel med radiolinjer (RL). For aksess til FDN benyttes en gateway (GTW) for å tilpasse formatet. RLER er ofte tidkrevende å sette opp, spesielt når avstanden og terrenget blir slik at det er nødvendig å bruke flere relestasjoner for å nå fram med signalet. TADKOM benytter RL i både UHF- og SHF-båndet.

Under forhold hvor det er vanskelig å etablere RL vil SATKOM være et mulig alternativ. For å gi ønsket mobilitet vil terminalen være montert i en TADKOM-vogn. For å gjøre oppkopling enklest mulig ønskes mest mulig automatikk i innretting av antennen mot satellitten.

Gatewayfunksjonen vil være i en terminal med aksess til FDN. Figur 5.2 illustrerer trunkforbindelse mellom TADKOM-noder og forbindelse til en terminal med aksess til FDN.

En slik løsning vil være ideell ved operasjoner hvor det er dårlig infrastruktur og vanskelig å etablere RL forbindelser. Dette vil kunne oppstå under operasjoner i utlandet hvor norske styrker får et ansvarsområde. I et slikt tilfelle vil en SATKOM løsning være enklere enn RL. Hvis oppdraget er mot en "svak" part vil en kommersiell løsning i mange tilfeller være tilfredsstillende fordi motparten sannsynligvis ikke vil være i stand til å ødelegge/forstyrre forbindelsen.



Figur 5.2 Trunkforbindelse mellom TADKOM noder og forbindelse til FDN via satellitt

### 5.3 Reserveforbindelse i FDN

Langs store deler av Nord-Norge er det kun to parallelle ruter i FDN. Det finnes ingen annen reserveforbindelse. Viktige brukere i FDN skal ha to separate og uavhengige utganger til nettet, og det er stilt krav til fleksibilitet, tilgjengelighet og seighet. På grunn av de topografiske forholdene er det mange steder i Norge vanskelig å oppnå dette.

Jordstasjonene som skal forbinde eventuelle taktiske brukere (TADKOM, SBLR) vil også kunne brukes som reserveforbindelse i FDN. Dette betinger at det finnes minst to jordstasjoner. For å støtte høye datarater, er det nødvendig med store jordstasjoner med store antenner og høy utgangseffekt. For å kunne bruke stor nok båndbredde vil frekvensen være forholdsvis høy.

I følge (1) forventes behovet for transportable sambandssystemer i FDN å øke vesentlig. Dette vil øke både fleksibiliteten og robustheten til systemet. Kjøretøymonterte SAT-KOM-terminaler vil tilfredsstillere disse kravene, og i følge (1) vil dette være kostnadsmessig realiserbart.

## 6 TEKNISKE LØSNINGER

For noen av dagens kommunikasjonssystemer i Forsvaret, der eksisterende løsninger ikke strekker til, kan SATKOM være et alternativ. Dette gjelder spesielt i tilfeller hvor det ikke er etablert kommunikasjon på forhånd og når "vanlig" radiokommunikasjon ikke når fram. Under er bruksområdene identifisert i kapittel 5 nærmere beskrevet med tekniske løsninger.

De forskjellige bruksområdene vil gjenspeile forskjellige krav til kapasitet og mobilitet som igjen gir krav til vekt og størrelse. I ene ytterkant kommer små bærbar terminaler og i den andre enden store, stasjonære jordstasjoner.

### 6.1 Satellitter

Dersom Forsvarets skal satse (sterkt) på SATKOM, er det ønskelig å ha et eget romsegment (satellitt og nødvendige kontrollfunksjoner), men kostnaden er sannsynligvis for stor. Alternativet er å leie nødvendig kapasitet på det kommersielle markedet. Per i dag synes dette å være eneste mulighet til å skaffe garantert aksess. På sikt vil det muligens være et alternativ å få tilgang på militær kapasitet i Storbritannias neste SATKOM system (SKYNET 5).

I beregningene i dette kapittelet antas det en GEO satellitt på 1°W. For tiden benyttes denne posisjonen av INTELSAT 707. GEO vil si at satellitten går i bane ca 36000 km over ekvator og vil holde seg i ro på himmelen sett fra jorden. Data og parametre om denne satellitten er vist i Appendiks E. Som det fremgår i Appendiks E varierer satellittens parametre avhengig av posisjonen i dekningsområdet terminalen befinner seg.

Tabell 6.1 viser noen typiske satellittparametre ved forskjellige frekvensbånd selv om det er store variasjoner som blant annet er avhengig av formål med, alder og størrelse av satellitten.

Frekvens / parametre	EIRP	G/T
L (Inmarsat 3)	48 dBW (maks)	ukjent
C (Intelsat 1° W)	42 dBW maks	0 dB/K
X	40 dBW	-10 dB/K
Ku (Intelsat 1° W)	47 dBW (Oslo)	5 dB/K
Ka (ACTS)	60 dBW	20 dB/K
EHF <sup>a</sup>	60 dBW	20 dB/K

Tabell 6.1 Noen typiske satellittparametre i retning Norge

a. Antatt samme parametre som for Ka-bånd

Det er også mulig å benytte andre satellitter enn GEO. Det finnes i dag systemer basert på LEO (Low Earth Orbit) og MEO (Medium Earth Orbit) satellitter i drift og under planlegging. LEO satellitter har en banehøyde på omtrent 1000km mens MEO satellitter har en banehøyde på omtrent 10000km. Fordelen med disse systemene er at mindre avstand til satellitten gjør det enklere å lage små terminaler. I dag finnes Globalstar, som tilbyr lavrate SATKOM. Flere systemer med større kapasitet er under planlegging. Høyere kapasitet vil kreve direkte antenner. Siden satellittene vil bevege seg sett fra et punkt på jorden betyr dette at antennene må være styrbare dersom de er direkte.

Tabell 6.2 gir oversikt over diameteren til dekningsområdet for en gitt antenneåpning for henholdsvis GEO, MEO og LEO satellitter når antennen peker rett ned. I tillegg vises dekningsområdet en GEO satellitt vil gi i Norge. Beregningene er basert på resultatene i Appendix A. En konsekvens av resultatene i tabell 6.2 er at for å oppnå små dekningsområder må høye frekvenser benyttes dersom det brukes GEO satellitter. Dette fordi praktiske antennessørrelser på en satellitt er begrenset og ofte ikke større enn 1m. Forbedret teknologi vil muliggjøre adskillig større antenner. Alternativt må satellitter i lavere baner benyttes.

Antennens åpningsvinkel	Diameter i km til dekningsområdet rett under satellitten			Dekningsområdet for GEO satellitt i Norge			
	GEO	MEO	LEO	Diameter i km	Pekeret ning	Sørlig bredde	Nordlig bredde
0,1°	62	17,5	1,75	216	63°	62°	64°
0,2°	125	35	3,5	433	63°	61°	65°
0,3	187	52	5,2	655	63°	60°	66°
0,4°	250	70	7	883	63°	59,5°	67°
0,6°	375	105	10,5	1377	63°	58°	70,3° (hele Norge)
1°	625	175	17,5	2380	61,5°	54°	75,4°
2°	1253	349	34,9	4005	64,6°	43,7°	79,8°
5°	3176	875	87	6435	39,3°	21,5°	79,4°
10°	6722	1766	175	9746	21,5°	7,4°	80,3°
17,4°	18000 global	3147	306	18000	global		

Tabell 6.2 Satellittens dekningsområde

## 6.2 Jordstasjonen

I et SATKOM system bør det være minst en større terminal (jordstasjon) som skal fungere som forbindelse (gateway) mellom terminaler og det jordbundne nettet. I tillegg kan den være nødvendig for å oppnå forbindelse mellom små terminaler. Jordstasjonen vil være karakterisert ved forholdsvis store antenner og høy sendereffekt. I et SATKOMsystem vil perifere brukere ved behov få aksess til det jordbundne nettet (FDN) gjennom jordstasjonen. Stasjonen kan ligge hvor som helst med fri sikt til satellitten og aksesspunkt til det jordbundne nettet. I tilfeller hvor det ikke er konflikt i Norge vil det være tilstrekkelig med stasjonære løsninger. I krise eller krig i Norge vil det være aktuelt med en transportabel løsning for å redusere sårbarheten ved angrep mot stasjonen. Det kan være aktuelt å ha en transportabel løsning som normalt vil være plassert ved en eller begge FKene. Jordstasjonen beskrevet her kan også fungere som reserveforbindelse i FDN. For store antenner vil det være nødvendig med automatisk styring for hele tiden å sikre at antennen peker i riktig retning. I tillegg kommer stabilisering av antennen på grunn av påvirkning av vind. Dette gjør at antennesystemer ofte er kostnadsdrivende for større terminaler.

I dette kapittelet er det antatt at jordstasjonen ligger i Stavanger (omtrent 59°N og 6°Ø) som er i sone B i klimasoneinndelingen i Figur 4.3. Mottakerantennen er satt til å være enten 2 eller 4,6m. Støyfaktoren antas å være 1 dB.

## 6.3 Terminaler for SBLR

Som nevnt i avsnitt 5.1 kan SATKOM være et alternativ til dagens løsning med bruk av HF radio for SBLR. De fysiske målene på bærbar terminaler må av praktiske årsaker være begrenset i tillegg til at vekten må være lav. Dette vil få innvirkning på kapasiteten fordi antennen må være liten. Krav til lav vekt fører til begrenset batterikapasitet som vil føre til at utgangseffekten fra forsterkeren blir lav. Under følger en vurdering av hva som kan forventes av kapasitet for en bærbar SATKOM terminal med begrensninger i antennessørrelse og utgangseffekt.

### 6.3.1 Terminaler for bruk på GEO satellitter

Figur 3.2 og figur 3.3 viser åpningsvinkelen og antennevinningen ved forskjellige frekvenser med antenneeffektivitet  $\eta = 0,6$ . Som figurene viser vil små antenner ha bred hovedlobe og liten antennevinning, spesielt ved lave frekvenser. For en antenne med diameter 0,5m betyr dette at antennen vil være forholdsvis enkel å rette inn mot satellitten fordi pekefeilen kan være stor uten at antennevinningen blir vesentlig redusert. Dette betyr også at automatisk innretting av antennen ikke er nødvendig. Et problem med bred hovedlobe er at signalet vil kunne føre til interferens på nabosatellitter dersom disse ligger innenfor bredden til hovedloben. Dette vil føre til en begrensning i utgangseffekten fordi internasjonale regler setter en grense på effektetthet mot nabosatellitter. Dette er spesielt relevant for frekvenser hvor det finnes mange satellitter. Spredt spektrum kan redusere effektettheten proporsjonalt med spreddefaktoren.

En løsning er å benytte kommersielle operatører. Inmarsat introduserte mini-M terminalene i forbindelse med Inmarsat-3 satellittene. Disse satellittene er konstruert for å levere nok effekt ( $EIRP = 48\text{dB}$ ) til å støtte små, bærbare terminaler ved at det er tilstrekkelig effekt i hver kanal. Tabell 6.3 viser beregnet signal-støy forhold ( $E_b/N_0$ ) for henholdsvis Nera mini-M (4,8 kbit/s) og Nera WorldCommunicator (64 kbit/s) terminaler. Ut fra figur

Inmarsat terminaltype	Mini-M 4,8 kbit/s	WorldCommunicator 64kbit/s
$E_b/N_0$	9 dB	16 dB

Tabell 6.3 Inmarsat bærbare terminaler i L-båndet via Inmarsat-3 satellitter

4.1 ser man at dette er tilstrekkelig for bitfeilsannsynlighet mindre enn  $10^{-4}$ .

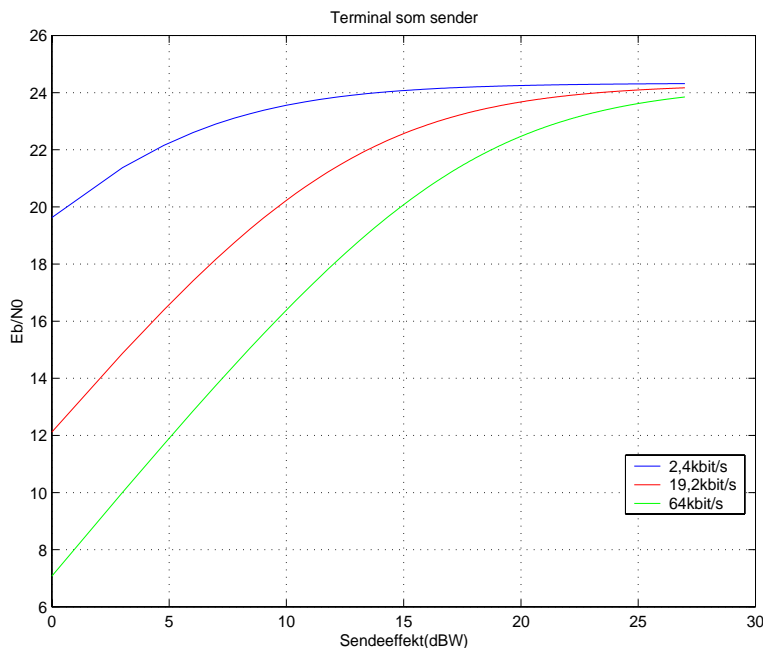
X-båndet for SATKOM har vært forbeholdt militære formål og det finnes derfor mange militære SATKOM systemer som bruker disse frekvensene. De fleste terminalene har vært store men etter hvert har det også dukket opp bærbare terminaler. Ved å gå enda høyere i frekvens vil tilgjengelig båndbredde bli større. Dette betyr økt kapasitet i satellitten og dermed potensielt flere brukere eller bedre beskyttelse.

For kommunikasjon med små terminaler vil design av linken fra satellitt til terminal være den vanskeligste. Dette kommer av at satellittens EIRP er begrenset og at terminalens  $G/T$  er liten. Dette betyr at systemet vil være effektbegrenset på nedlinken. Mer effekt fra senderen på bakken vil ikke føre til mer effekt ut av satellitten fordi satellitten går i metning. Kvaliteten kan forbedres ved å bruke mer ressurser i transponderen enten ved å bruke mer båndbredde enn signalets ukodede båndbredde eller å øke satellittens effekt i den aktuelle kanalen. Tabell 6.4 viser hvilket signal-støy forhold som kan oppnås ved å utvide kanalbåndbredden på et nedlinkbegrenset system. Som tabellen viser er det mulig å benytte små terminaler ved å øke båndbredden. Ved å bruke koding som en del av båndbreddeutvidelsen, vil resultatet bli enda bedre enn vist i tabellen. Så lenge signalet på opplinken er sterkt nok, vil ikke totalt  $E_b/N_0$  endre seg ved ytterligere å øke utgangseffekten på opplinken.

båndbredde	2,4 kbit/s	64 kbit/s	256 kbit/s
$E_b/N_0$	-8dB	6dB	12dB

Tabell 6.4 En 0,5m terminal i X-bånd som mottar et 2,4kbit/s QPSK signal i henholdsvis 2,4, 64 og 256 kbit/s kanaler via en 40 MHz transponder med  $EIRP = 40\text{dB}$  og  $G/T = 0$ .

Figur 6.1 viser tilfellet hvor en liten terminal sender til en jordstasjon i X-bånd uten å benytte ekstra båndbredde. Utgangseffekt på 1W er tilstrekkelig for å oppnå samband ved fri sikt i 99% av tiden. Totalt  $E_b/N_0$  vil i dette tilfellet bli enda bedre ved å øke utgangseffekten. Dette gjelder til kurvene flater ut. Dersom maksimal utgangseffekt er nådd og  $E_b/N_0$  er for dårlig til å oppnå tilfredsstillende kvalitet, vil det være mulig å forbedre signalet



Figur 6.1 Figuren viser samband mellom terminal og en større jordstasjon med tilgjengelighet på 99%. Satellittens parametere er EIRP = 40 dB og G/T = 0.

ved å redusere kapasiteten. Et adaptivt system vil gjøre dette automatisk slik at linken utnyttes optimalt.

Det kan være ønskelig å kunne etablere forbindelse mellom to bærbare terminaler. Det kan gjøres enten ved å gå via jordstasjonen eller å opprette direkte forbindelse. Tabell 6.4 og figur 6.1. viser hver av forbindelsene mellom to bærbare terminaler når de går via jordstasjonen. Forbindelsen vil være begrenset av den svakeste linken. Tabell 6.5 viser tilfellet hvor to terminaler med antennediameter på 0,5m kommuniserer med 2,4kbit/s i en 256kbit/s kanal. Sendereffekten er 1W og tilgjengelighet antas å være 99%. Tabellen viser at så lenge fri sikt er tilstede vil det være mulig å etablere forbindelse direkte mellom to bærbare terminaler ved å bruke tilstrekkelig båndbredde. Som beskrevet i avsnitt 4.1.3 blir

Frekvensbånd	X bånd	Ku bånd	EHF bånd
Min $E_b/N_0$	11,75dB	10,4dB	4dB

Tabell 6.5 To 0,5m terminaler som kommuniserer i X-, Ku- og EHFbånd med 2,4kbit/s QPSK signal i 256 kbit/s kanaler via en 40 MHz transponder med EIRP = 40dB og G/T = 0. Sendeeffekt er 1W.

dempning på grunn av nedbør betydelig når frekvensen overstiger 10 GHz.

Det største problemet med bærbare terminaler mot GEO satellitter er at elevasjonsvinkelen er liten. Dette gir problemer med vegetasjonsdempning i skog spesielt ved høye frekvenser (avsnitt 4.1.4) og at fjellskyggen blir stor (avsnitt 4.1.5). Problemene med diffraksjonstap og fjellskygge er spesielt store i Nord-Norge og på Vestlandet. Dette er vist i forskjellige dekningsdiagrammer i Appendiks F hvor svarte felter illustrerer fjellskyggen. Disse tapene vil kunne bli så store at det i realiteten betyr blokkering av kommunikasjon.

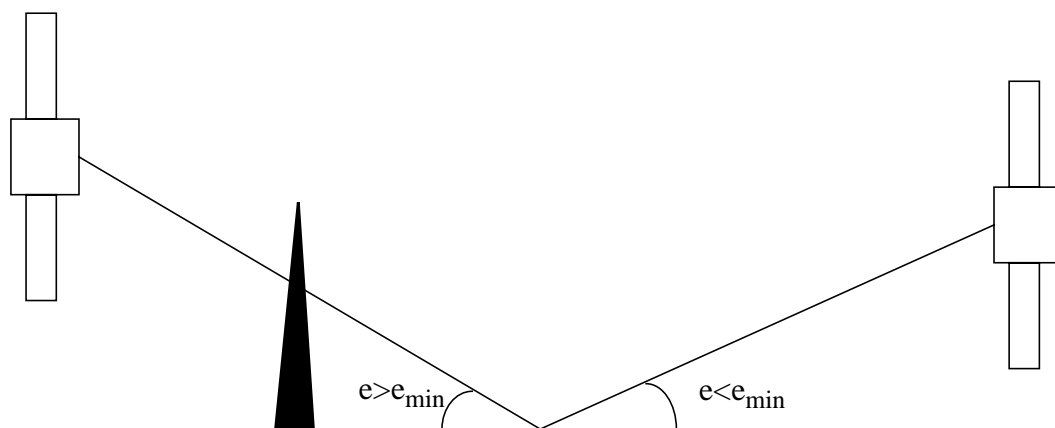


Ved bruk av bærbare terminaler vil det bety at brukeren kan risikere å måtte bevege seg ganske langt for å finne steder hvor det er mulig å få fri sikt til satellitten.

### 6.3.2 Terminaler for bruk på ikke-GEO satellitter

Eksisterende teknologi for GEO SATKOM krever direkte antenner på terminalen fordi satellittene har for lav *EIRP*. Dette gjør det umulig å bruke håndholdte terminaler fordi tilstrekkelig direktivitet krever en viss størrelse på antennen. Ønskes en løsning med håndholdte terminaler må derfor avstanden til satellitten reduseres for å kompensere for mindre antennevinning. Da vil ikke lenger satellitten være på samme sted sett fra jorden. Den håndholdte terminalen bør derfor ha en antenne med stor nok åpningsvinkel for å dekke satellitten uansett hvor den befinner seg på himmelen samtidig som antennevinningen blir størst mulig for best mulig mottakerforhold.

Selv om satellittene vil bevege seg vil fjellskygge fremdeles være et problem. Dette fordi systemene krever en minste elevasjonsvinkel  $e_{min}$  for å sikre kommunikasjon ved fri sikt. Figur 6.2 illustrerer et tilfelle når en satellitt med elevasjonsvinkel  $e$  større enn  $e_{min}$  blokkeres i fjellskyggen mens de nærmeste satellittene har elevasjonsvinkel mindre enn  $e_{min}$ . Da blir det brudd i sambandet. En fordel er likevel at det vil være mulig å overføre noe data fordi en satellitt stort sett av og til vil komme innenfor frisisikt til terminalen. Ikke-GEO satellitter vil heller nødvendigvis ikke bety lav elevasjonsvinkel i Norge fordi satellittene kan gå i baner som passerer Norge. Da vil elevasjonsvinkelen variere fra  $90^\circ$  til  $0^\circ$ . Det skulle tilsi at det burde være mulig å etablere samband for en begrenset periode med et slikt system.



Figur 6.2 Begrensninger p g a minimum elevasjonsvinkel ved ikke-GEO satellittkommunikasjon

Denne løsningen er aktuell med tanke på de nye satellittbaserte personlige kommunikasjonssystemene (S-PCS) som innføres. Som eksempel kan nevnes Globalstar, Ellipso og ICO. Disse er kun beregnet for lavrate kommunikasjon. S-PCS gir muligheter for kommunikasjon via satellitt uten store forhåndsinvesteringer og er godt egnet i tilfeller hvor kravet til sikkerhet ikke er stort. I tillegg kan også Orbcomm nevnes. Dette er et lavrate meldingssystem.

De fleste av disse systemene har økonomiske problemer fordi det er for få brukere. Det er derfor usikkert hvor reell denne muligheten vil være i framtiden

Sikkerhetsmessig må det vurderes i hvor stor grad Forsvaret kan nytte slike kommersielle håndholdte satellittermineraler. For bruk i forbindelse med fredsbevarende operasjoner burde dette være et aktuelt alternativ fordi motparten ofte ikke er i stand til å dra nytte av svakhetene til slike kommersielle systemer.

### 6.3.3 Delkonklusjon

Dette avsnittet viser at det er mulig å bruke SATKOM for SBLR. For transpondere med stor båndbredde vil tilgjengelig effekt/Hz kunne være for liten til å støtte et smalbåndet signal. Det må da benyttes større ressurser i transponderen. Dette kan løses ved å bruke spredt spektrum for å oppnå tilstrekkelig båndbredde. Samtidig vil dette begrense effekt-tettheten som interfererer med nabosatellitter som bruker samme frekvensbånd. Siden det ofte må benyttes større båndbredde enn et ukodet signal krever vil fornuftig koding (kapittel 4.4) kunne spare båndbredde fordi kodingsgevinsten kan tas ut i bruk av mindre båndbredde. Ellers kan kodingsgevinsten brukes til å adaptivt tilpasse dataraten til kvaliteten i kanalen slik at maksimal kapasitet benyttes til enhver tid. Dette kan brukes til å redusere ulempen med demping i regn ved høye frekvenser. Den ekstra båndbredden oppnådd ved bruk av spredt spektrum kan også brukes til beskyttelse mot jamming og deteksjon. Betingelsene for forbindelse er fri sikt til satellitten. Problemer vil oppstå ved demping i vegetasjon (avsnitt 4.1.4) og fjellskygge (avsnitt 4.1.5). Disse problemene kan for SBLR bli så betydelige at det flere steder i Norge vil gi begrensninger i hvor GEOsamband er mulig.

En mulighet er også å benytte ikke-GEO SATKOM systemer. Fordelen med disse er at terminalene blir håndholdte og dermed lette å bære. Ulempen er at systemene er kommersielle og det kan innebære begrenset sikkerhet. I tilfeller hvor det ikke stilles store krav til sikkerhet vil dette kunne være en kostnadseffektiv løsning. Det største problemet er likevel at det er usikkert hvor lenge en slik tjeneste vil eksistere siden mange av systemene har store økonomiske problemer.

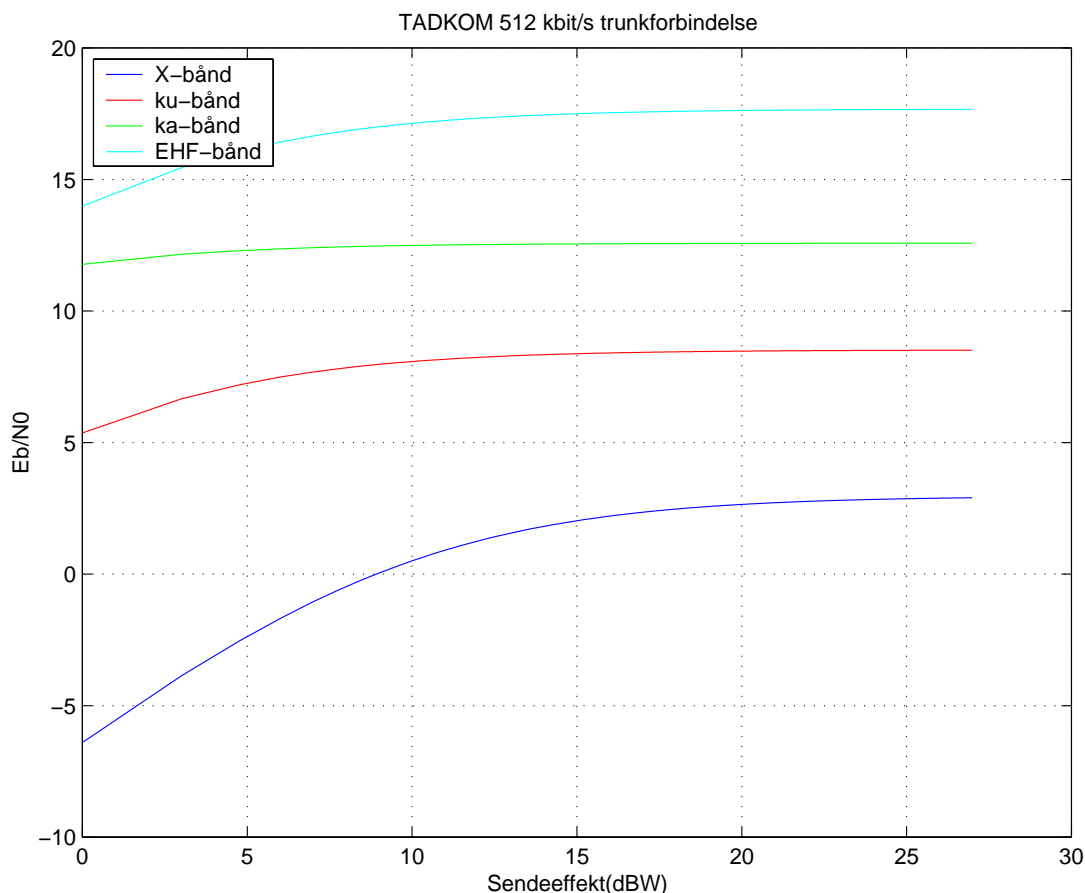
## 6.4 Terminaler for TADKOM trunkforbindelse

Som nevnt i avsnitt 5.2 er trunkforbindelsen i TADKOM på 512 kbit/s. Det betyr at SATKOM systemet må dimensjoneres for denne dataraten med de krav dette stiller til antenestørrelse og sendereffekt. Det vil også være et krav at terminalen skal stå på et kjøretøy og at forbindelsen skal kunne etableres raskt uten bruk av mange personer.

SATKOM er kostbart. Ved å kunne dele TADKOM forbindelsen inn i mindre kanaler vil resursutnyttelsen bli bedre fordi kapasiteten på 512 kbit/s ofte ikke brukes fullt ut. En oppdeling i mindre kanaler vil også gjøre det enklere å holde en viss forbindelse selvom kanalen er for dårlig til å støtte 512 kbit/s.

## 6.4.1 Terminaler for bruk på GEO satellitter

Dette avsnittet tar for seg et system hvor kommunikasjonen går via GEO satellitter. Figur 6.3 viser linkberegninger mellom to TADKOM noder for frekvenser i X-, Ku-, Ka- og



Figur 6.3 TADKOM 512 kbit/s trunkforbindelse i X-, ku-, ka- og EHF-bånd med 1m antenne og OBO gitt i tabell 4.2 og satellittparametre gitt i tabell 6.1.

EHF-båndet med antennediameter på 1m. Det er beregnet signal-støy forhold med forventet regndempning som ikke overstiges i 99% av tiden i klimasone for Bodø. Satellittparametre og OBO er gitt i tabell 4.2 og tabell 6.1. Beregningene viser at det er oppnåelig å etablere kommunikasjon i alle frekvensområdene untatt i X-båndet uten å allokere ekstra ressurser i satellitten. Det må tas hensyn til usikkerheten i gyldigheten til satellittparametrene.

For å spare plass kan det være ønskelig å gå enda mer ned på antennessørrelsen. Dette kan være nødvendig for å slippe å ha forskjellige TADKOM kjøretøy for RL og SATKOM. Siden antennevinningen er proporsjonal med kvadratet til antennediameteren (se Ligning (3-1)), vil en reduksjon fra 1m til 0,5m føre til en reduksjon i 6dB på linkmarginen. I henhold til figur 6.3 vil det fremdeles være mulig å opprettholde kommunikasjon i Ka- og EHF båndet fordi disse satellittene har bedre parametre (se tabell 6.1). Som beskrevet i avsnitt 5.1 kan økt båndbredde løse problemet med en dårlig linkmargin fordi større ressurser i satellitten tas i bruk. I tillegg kan det være ønskelig å benytte spredt spektrum for å beskytte signalet.

Et problem med små antenner er at disse har forholdsvis bred hovedlobe. Dette kan føre til interferens på nabosatellitter og også gjøre det enklere å detektere signalet. Problemet med bred hovedlobe er minkende med økende frekvens fordi lobebredden er omvendt proporsjonal med antennediameteren (se Ligning (3-2)). Forøvrig viser figur 3.2 antennens åpningsvinkel ( $\theta_{3dB}$ ) ved forskjellige frekvenser og antennestørrelser. Som det går frem av figuren, vil åpningsvinkelen være så stor at det ikke vil være nødvendig med automatisk antennestyring dersom effektbudsjettet tåler litt tap pga pekefeil som vil oppstå når satellitten driver i posisjonen. Beskyttelse eller stabilisering av antennen vil ofte være nødvendig for å redusere påvirkning av faktorer som vær og vind.

Problemerkene med fjellskygge og vegetasjon beskrevet i henholdsvis avsnitt 4.1.5 og avsnitt 4.1.4 vil være gjeldende men siden terminalen er montert på et kjøretøy og har en ren sambandsfunksjon, vil det ofte være mulig å velge en lokasjon hvor fri sikt til satellitten kan oppnås.

#### 6.4.2 Terminaler for bruk på ikke-GEO satellitter

Bruk av systemer uten GEO satellitter medfører reduserte effektkrav p g a kortere avstand. Det betyr at terminalene/antennene kan bli mindre enn for tilsvarende GEO systemer mens kapasiteten opprettholdes. Forholdsvis høy kapasitet vil fremdeles føre til at antennen må være direktiv. Dette krever antennestyring. Siden antennen likevel er forholdsvis liten, vil ikke dette bli altfor dyrt. Problemerkene med vegetasjonsdempning og fjellskygge vil være like store for disse systemene. Siden satellittene vil bevege seg på himmelen sett fra et punkt på jorden, vil det være nødvendig å posisjonere seg slik at det alltid vil være tilgjengelig minst en satellitt for å ha kontinuerlig kommunikasjon.

Det er enda ikke realisert slike høykapasitets SATKOM systemer. Selv om flere systemer er under planlegging knytter det seg stor usikkerhet til om hvor stort markedet for disse systemene er og om noen i det hele tatt vil bli realisert. For eksempel kan Teledesic og SkyBridge nevnes. SkyBridge skal bestå av 80 satellitter i en høyde på 1469km og kommunikasjonen foregår i Ku-båndet mens Teledesic skal bestå av 288 satellitter i 1375km høyde med kommunikasjon i Ka-båndet. Kapasiteten vil variere fra 2Mbit/s til 64 Mbit/s avhengig av terminaltype og system. Det må presiseres at dette er kommersielle systemer med de begrensninger det eventuelt måtte medføre for militære brukere. En stor ulempe for disse satellittsystemene er at trådløse, jordbaserte systemer som UMTS kommer til å tilby en vesentlig større kapasitet enn GSM og vil bli en stor konkurrent til de satellittbaserte systemene. I tillegg blir disse landbaserte systemene sannsynligvis mye billigere enn de satellittbaserte.

#### 6.4.3 Delkonklusjon

Avsnittet har tatt for seg bruk av SATKOM til TADKOM trunkforbindelse. Siden terminalene vil være montert på kjøretøy vil dette gjøre det enklere å unngå problemene med fjellskygge og vegetasjonsdempning fordi det ofte er akseptabelt å forflytte seg slik at fri sikt oppnås.

Det er planlagt mange ikke-GEO høykapasitets satellittsystemer. Dette kan være en attraktiv løsning dersom Forsvaret ikke har absolutt behov for full kontroll over ressursene. TADKOM kan tenkes brukt i f.eks. fredsbevarende oppdrag hvor en noe redusert sikkerhet kan være akseptabel. Selv om mange systemer er planlagt, har de fleste økonomiske problemer og det er derfor usikkert om systemene blir realisert eller kommer til å overleve.

## 7 OPPSUMMERING OG KONKLUSJON

Satellittkommunikasjon (SATKOM) er et område i sterk vekst, og inngår i stadig større grad i forsvarssystemene til mange land. I den forbindelse ønsker også Norge å se på hvilke muligheter som finnes for bruk av SATKOM. Slike satellittsystemer er svært kostbare, slik at Norge neppe har mulighet til å ha egne systemer. Det er imidlertid mulig å bli med på samarbeidsprosjekt der flere land og/eller selskaper går sammen om et satellittsystem.

I første del av denne rapporten ble generelle problemstillinger rundt satellittkommunikasjon belyst med temaer som hvilke frekvenser og båndbredder som brukes i dagens systemer, og fordeler og ulemper med disse. Likeså ble antenner og antennestyling diskutert. Linkbudsjettet for et generelt satellittsystem ble beskrevet, og spesielt ble det sett på forskjellige typer demping som atmosfæredempning, troposfærisk scintillasjon, demping på grunn av nedbør, vegetasjonsdempning og diffraksjonstap på grunn av fjellskygge. I forbindelse med linkbudsjettet ble også terminalens støytemperatur, transponder "back off", intermodulasjon og feilkorrigerende koding tatt opp.

De mest aktuelle bruksområder i Forsvaret som her er tatt opp er radiokommunikasjon for samband lang rekkevidde (SBLR), TADKOM trunkforbindelse og reserveforbindelse i FDN. Satellitten, jordstasjonen og terminalene for slike systemer ble også diskutert.

Konklusjonen er at for SBLR vil problemer med fjellskygge og vegetasjonsdempning ved bruk av geostasjonære satellitter flere steder i Norge være så store at det medfører begrensninger for operasjonene. Problemet blir størst i Nord-Norge på grunn av lav elevasjonsvinkel, men fjellskygge kan også være et problem på Vestlandet. Bruk av ikke-GEO systemer vil også være utsatt for fjellskygge men siden disse satellittene beveger seg på himmelen vil det ofte være mulig å opprette forbindelse når en satellitt passerer. Dette kan være tilstrekkelig for å få overført informasjon. TADKOM-knutepunkter er imidlertid kjøretøymonterte og anses for å ha større muligheter til å velge gunstige posisjoner med hensyn på satellittdekning. SATKOM vil derfor i mange tilfeller gjøre det enklere å opprette forbindelse enn ved bruk av radiolinjer. Også for TADKOM kan ikke-GEO systemer være aktuelle. Når det gjelder regndempning, så er dette et relativt lite problem med norsk klima. Generelt for ikke-GEO systemer viser det seg at markedspotensialet er mye mindre enn tidligere antatt slik at fremtiden for slike systemer er svært usikker.

### Litteratur

- (1) FO/I (1999): Militær bruk av satellittkommunikasjon.
- (2) FO/I (1993): Studie om Forsvarets bruk av satellittkommunikasjon.

- (3) Arneson Vegard (1998): En oversikt over noen satellittkommunikasjonssystemer, FFI rapport-98/04497.
- (4) Stette Gunnar (1996): Radiokommunikasjon, NTNU, Institutt for Teleteknikk.
- (5) Maral G, Bousquet M (1998): Satellite Communications Systems, Wiley.
- (6) Gutteberg, Odd: Forelesningsnotater utdelt i fag UNIKI 301, Satellittkommunikasjon våren 1998.
- (7) Maseng, T (1985): The power spectrum of digital FM as produced by digital circuits; Signal Processing 9 253 - 261, Elsevier Science Publishers B.V.
- (8) Torrieri Don J (1992): Principles of Secure Communications Systems, Second edition, Artech House.
- (9) Al-Nuaimi M.O, Stephens R.B.L (1998): Measurements and prediction model optimisation for signal attenuation in vegetation media at centimetre wave frequencies, IEE Proc. -Microw. Antennas Propag., Vol. 145.
- (10) JODALEN Vivianne, BERG SVIK Torgeir (1998) :HF.bølgeutbredelse basiskunnskap, samt kort brukerveiledning til prediksjonsprogrammet ICEPAC, FFI/RAPPORT 98/05322, Forsvarets forskningsinstitutt
- (11) BERG SVIK Torgeir (1998): Evalueringer av HF-modemer og flerfrekvenssystemer basert på kanalmålinger på høye breddegrader, FFI/RAPPORT-98/04983
- (12) HALL M.P.M., BARCLAY L.W., HEWITT M.T.: Propagation of Radiowaves, *The Institution of Electrical Engineers*, 1996.
- (13) SHANNON C.E. (1948): A Mathematical Theory of Communication, *Bell Syst. Tech. J.*, vol. 27, pp.379-423, 1948.
- (14) SKLAR Bernard: Digital Communications, Fundamentals and Applications, *Prentice Hall International Editions*, 1988.
- (15) COSTELLO D. J., HAGENAUER J., IMAI H., WICKER S.B.(1998): Applications of Error-Control Coding, *IEEE Transactions on Information Theory*, vol. 44, no. 6, 1998.
- (16) BERROU C., GLAVIEUX A., THITIMAJSHIMA (1993): Near Shannon limit error-correcting coding and decoding: Turbo codes, *Proc. 1993 IEEE Int. Communications Conf.* (Geneva, Switzerland, May 1993), pp.1064-1070.
- (17) GUTTEBERG Odd: Effects of atmosphere on earth-space radio propagation, Forelesningsnotat utdelt i fag UNIKI 301 Satellittkommunikasjon, våren 1998.

- (18) PRATT Timothy, BOSTIAN Charles W (1986): Satellite communications: Wiley

**Forkortelser**

BER	bitfeilsannsynlighet
BPSK	binær PSK
DSSS	Direkte sekvens spredt spektrum
EIRP	Equivalent Isotropic Radiated Power
EK	elektronisk krigføring
FH	Frekvenshopping
GEO	Geostationary Earth Orbit
GTW	Gateway
HF	High Frequency
IBO	Input back off
IM	Intermodulasjon
LEO	Low Earth Orbit
LNA	lavstøyforsterker
LOS	Line of sight
MEO	Medium Earth Orbit
MTK	mobiltilknytning
NF	støyfaktor
OBO	Output back off
pn	pseudonoise
RL	radiolinje
S-PCS	satellittbaserte personlige kommunikasjonssystemer
SATKOM	satellittkommunikasjon
SBLR	samband lang rekkevidde
VPD	virksomhet på dypet

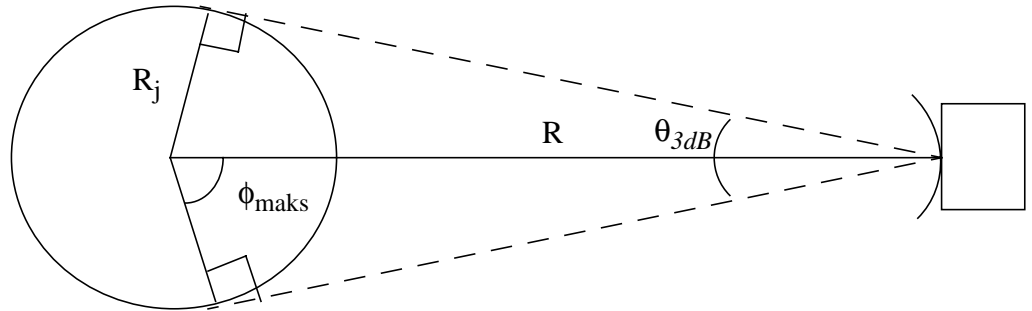


## APPENDIKS

## A SATELLITTENS DEKNINGSOMRÅDE

Det området som satellitten dekker vil være avhengig av satellittens posisjon, bane, antennestørrelse, antennens pekeretning og frekvens.

Maksimal (global) dekning fra en satellitt er vist i figur A.1 hvor  $R$  er satellittbanens ra-



Figur A.1 Satellittens dekning av jorda

dus,  $R_j$  er jordradius (omtrent 6370 km) og  $\theta_{3dB}$  er 3 dB vinkelen til antennen. For en GEO satellitt er  $R = 42164,2$  km. Geometriske betraktninger gir da antennens åpningsvinkel for global dekning:

$$\theta_{3dB} = 2 \sin^{-1} \left( \frac{R_j}{R} \right) = 17,4^\circ \quad (A-1)$$

Teoretisk grense for dekning mot nord og sør ( $\phi_{maks}$ ) blir da

$$\phi_{maks} = 180^\circ - 90^\circ - \frac{\theta_{3dB}}{2} = 81,3^\circ \quad (A-2)$$

Da vil antennen ha en elevasjonsvinkel på  $0^\circ$ . Dette betyr at alt fastland i Norge er innenfor dekningsområde for GEO satellitten.

Anta en satellitt rett sør med pekeretning mot breddegrad  $\phi$  på den nordlige halvkule og antennevinkel  $\theta_{3dB}$ . Diameteren  $D_{3dB}$  til dekningsområdet blir da

$$D_{3dB} = (\phi_{maks} - \phi_{min})_{radianer} R_j \quad (A-3)$$

hvor

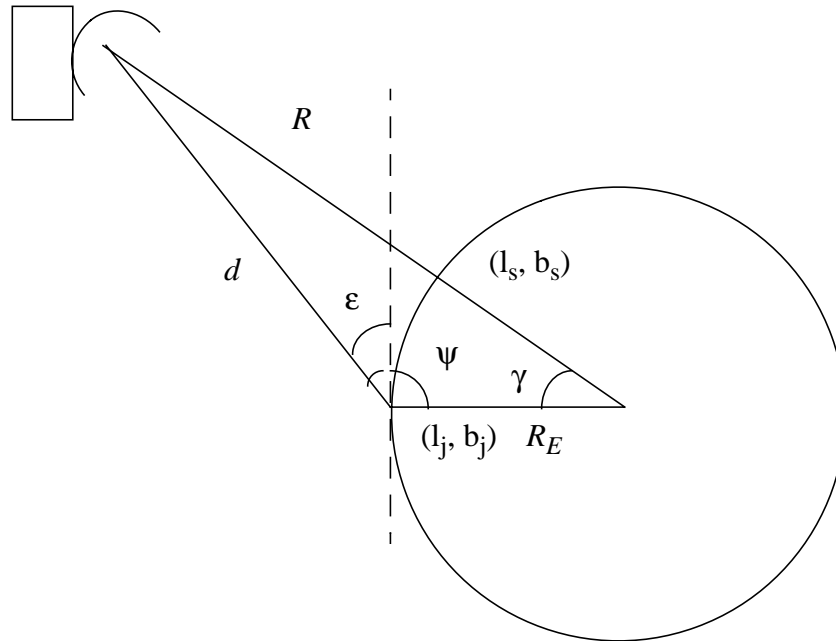
$$\phi_{maks} = 180 - \delta_{min} - \rho_{maks} \quad \text{og} \quad \phi_{min} = 180 - \delta_{maks} - \rho_{min}, \quad (A-4)$$

$$\delta_{min} = \sin^{-1} \left( \frac{R \sin(\rho_{maks})}{R_j} \right) \quad \text{og} \quad \delta_{maks} = \sin^{-1} \left( \frac{R \sin(\rho_{min})}{R_j} \right), \quad (A-5)$$



### A.1 Antennens elevasjonsvinkel

Antennens elevasjonsvinkel er vinkelen mellom tangentialplanet og antennens pekeretning mot satellitten vist i figur A.4. Den kan bestemmes ved hjelp av lengde- og breddegraden ( $l_j$  og  $b_j$ ) til jordstasjonen, lengde- og breddegraden ( $l_s$  og  $b_s$ ) til subsatellittpunktet og vinkelen  $\gamma$  mellom dem. Subsatellittpunktet er det punkt som en linje mellom satellitten og jordas senter vil treffe jordoverflaten. Uttrykkene er hentet fra (18), side 24.



Figur A.4 Antennens elevasjonsvinkel  $\epsilon$ .

Vinkelen  $\gamma$  kan uttrykkes som

$$\cos(\gamma) = \cos(b_j)\cos(b_s)\cos(l_s - l_j) + \sin(b_j)\sin(b_s) \quad (A-10)$$

Videre gir cosinussetningen (Ligning (A-8)) følgende uttrykk for avstanden  $d$  fra jordstasjonen til satellitten:

$$d = R \sqrt{1 + \left(\frac{R_E}{R}\right)^2 - 2\frac{R_E}{R}\cos(\gamma)} \quad (A-11)$$

og sinussetningen (Ligning (A-9)) gir

$$\frac{d}{\sin(\gamma)} = \frac{R}{\cos(\epsilon)} \quad (A-12)$$

fordi

$$\varepsilon = \psi - 90^\circ \quad (\text{A-13})$$

Et uttrykk for elevasjonsvinkelen  $\varepsilon$  finnes ved å kombinere Ligning (A-11) og Ligning (A-12):

$$\cos(\varepsilon) = \frac{R \sin(\gamma)}{d} = \frac{\sin(\gamma)}{\sqrt{1 + \left(\frac{R_E}{R}\right)^2 - 2\frac{R_E}{R} \cos(\gamma)}} \quad (\text{A-14})$$

For geostasjonære satellitter vil breddegraden  $b_s$  til subsatellitpunktet være 0. Da finnes følgende spesialtilfelle for Ligning (A-14):

$$\begin{aligned} \cos(\varepsilon) &= \sqrt{\frac{1 - (\cos(b_j) \cos(l_s - l_j))^2}{1 + \left(\frac{R_E}{R}\right)^2 - 2\frac{R_E}{R} (\cos(b_j) \cos(l_s - l_j))}} \\ &= \sqrt{\frac{1 - (\cos(b_j) \cos(l_s - l_j))^2}{1.02282 - 0.30215 (\cos(b_j) \cos(l_s - l_j))}} \end{aligned} \quad (\text{A-15})$$

## APPENDIKS

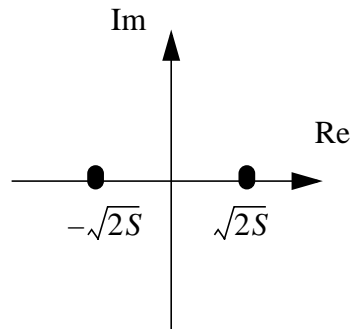
## B BITFEILSANNSYNLIGHET FOR BPSK

I et BPSK signal  $s(t)$  vist i Ligning (B-1) endres fasen i sprang på  $\pi$  radianer. Det er det samme som at polariteten endres mellom +1 og -1. Dette er vist i Figur B.1.

$$\begin{aligned} s(t) &= \sqrt{2S} \cdot q(t) \cdot \cos(\omega_0 t + \theta_0) \\ &= \sqrt{2S} \cdot \cos(\omega_0 t + \varphi(t) + \theta_0) \end{aligned} \quad (B-1)$$

hvor  $\omega_0$  er bærebølgen,  $\theta_0$  er fasen ved tiden  $t_0$ ,  $q(t) = \pm 1$  og  $\varphi \in \{0, \pi\}$  hvor det er utnyttet at

$$\cos(0) = 1 \quad \text{og} \quad \cos(\pi) = -1. \quad (B-2)$$



Figur B.1 Signaldiagram for BPSK modulasjon

Hvit gaussisk støy med forventningsverdien  $\mu$  og varians  $\sigma^2$  vil ha en sannsynlighetstetthetsfordeling  $f(x)$  gitt ved

$$f(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} e^{-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}} \quad (B-3)$$

Sannsynligheten  $P(0)$  for at  $x > 0$  vil være gitt av

$$P(0) = \int_0^{\infty} f(x) dx = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} \int_0^{\infty} e^{-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}} dx = \frac{1}{\sqrt{\pi}} \int_{-\frac{\mu}{\sigma}}^{\infty} e^{-y^2} dy = \frac{1}{2} \operatorname{erfc}\left(-\frac{\mu}{\sigma}\right) \quad (B-4)$$

hvor den komplementære feilfunksjonen  $\operatorname{erfc}(x)$  er gitt av

$$\operatorname{erfc}(x) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_x^{\infty} e^{-y^2} dy \quad (B-5)$$

Anta at et BPSK signal med effekt  $S$  sendes i hvit gaussisk støy med forventningsverdien  $\mu = 0$  og støytetthet  $N_0/2$ . To påfølgende symbol antas å være uavhengige og med lik sannsynlighet for 0 og 1. Ved ideell deteksjon av et signal vil forventningsverdien være  $\pm\sqrt{2E_bT_b}$  avhengig av sendt symbol mens variansen er uavhengig av symbolet og er gitt ved  $T_bN_0$  hvor  $T_b$  er varigheten av et bit.

Da vil bitfeilsannsynligheten  $BER_{BPSK}$  for BPSK være gitt ved

$$\begin{aligned}
 BER_{BPSK} &= \frac{1}{2}P(0|1) + \frac{1}{2}P(1|0) && (B-6) \\
 &= \frac{1}{2\sqrt{2\pi\sigma_0}} \int_0^{\infty} e^{-\frac{(x+\sqrt{2E_bT_b})^2}{2T_bN_0}} dx + \frac{1}{2\sqrt{2\pi\sigma_0}} \int_{-\infty}^0 e^{-\frac{(x-\sqrt{2E_bT_b})^2}{2T_bN_0}} dx = \frac{1}{2} \operatorname{erfc} \left( \sqrt{\frac{E_b}{N_0}} \right)
 \end{aligned}$$

Funksjonen er vist i figur 4.1.

## APPENDIKS

### C REGNDEMPNING

Regndempning oppstår fordi regndråpene fører til absorpsjon og avbøyning av radiobølgene. Hvor stor dempningen er vil være avhengig av fordelingen på dråpeformen og regnintensiteten. I henhold til (18), avsnitt 8.3 vil et generelt uttrykk for tettheten av dråper  $N(D)$  være eksponentiell:

$$N(D) = N_0 \exp\left(\frac{-D}{D_m}\right) \text{ mm}^{-1} \text{ m}^{-3} \quad (C-1)$$

hvor  $D_m$  er midlere dråpediameter,  $N_0$  er en konstant og  $D$  er diameteren. Videre vil regnintensiteten  $R$  være avhengig av  $N(D)$  og hastigheten  $V(D)$  til dråpene:

$$R = 0.6 \times 10^{-3} \pi \int D^3 V(D) N(D) dD \text{ mm/h} \quad (C-2)$$

For satellittkommunikasjon vil  $R$  generelt ikke være konstant over hele veien  $L$  gjennom regnet. Videre vil  $R$  og dermed  $L$  være tidsavhengige. Et generelt uttrykk for dempningen  $A_R(t)$  vil da være

$$A_R(t) = \int_0^{L(t)} k [R(y, t)]^\alpha dy \text{ dB} \quad (C-3)$$

$\alpha$  og  $k$  er koefisienter som er sterkt frekvensavhengige og mindre avhengig av polariseringen og er gitt av Ligning (C-6). Ligning (C-3) er lite praktisk i bruk fordi den krever øyeblikksmålinger av  $R$ . Det er vanligere å benytte en statistisk karakterisering av regndempningen  $A_R$  med tilhørende intensitet  $R$ . Jorda deles inn i soner som gir en beskrivelse av hvor høy regnintensiteten er forventet å være i de forskjellige sonene i prosent av tiden gjennom et helt år. Norge deles ofte inn i tre slike soner. Disse er vist i Figur 4.3.

Regnintensiteten i sonene i prosentvis del av året er vist i Tabell C.1. I (5), avsnitt 2.6.1.1 er det beskrevet en metode (ITU-R PN618) for å beregne regndempning ut fra verdiene i Tabell C.1 og som er gjengitt under.

Regndempningen  $A_R$  er gitt som

$$A_R = \gamma_R L_e \quad (\text{dB}) \quad (C-4)$$

hvor  $\gamma_R$  (dB/km) er spesifikk dempning og  $L_e$  er ekvivalent lengde (km) gjennom regn.  $\gamma_R$  er frekvensavhengig, og kan uttrykkes som

$$\gamma_R = k(R_{0,01})^\alpha \quad (C-5)$$

Her er  $k$  og  $\alpha$  frekvensavhengige koefisienter gitt ved

% av året	Sone A	Sone B	Sone C
1	2	3	7
0,1	7	12	20
0,05	11	16	25
0,01	22	30	36

Tabell C.1 Regnintensitet  $R_p$  i klimasonene i Norge i prosent av året

$$k = \frac{[k_H + k_V + (k_H - k_V) \cos^2(\epsilon) \cos(2\tau)]}{2} \quad (C-6)$$

$$\alpha = \frac{[k_H \alpha_H + k_V \alpha_V + (k_H \alpha_H - k_V \alpha_V) \cos^2(\epsilon) \cos(2\tau)]}{2k}$$

hvor  $k_H$ ,  $k_V$ ,  $\alpha_H$  og  $\alpha_V$  er koefisienter gitt i Appendiks D,  $\epsilon$  er elevasjonsvinkelen til antennen og  $\tau$  er polarisasjonens tiltvinkel, d v s vinkelen mellom ellipsens hovedakse og horisontalaksen ( $\tau = 45^0$  for sirkulær polarisasjon).  $R_{0,01}$  er regnintensiteten for 0,01% av tiden gitt i Tabell C.1.  $L_e$  i Ligning (C-4) er gitt ved

$$L_e = L_s r_{0,01} \quad (C-7)$$

Avstanden  $L_s$  gjennom regnskuren er gitt ved

$$L_s = \frac{(h_R - h_S)}{\sin(\epsilon)} \quad \text{gyldig for } \epsilon > 5^0 \quad (C-8)$$

hvor  $h_S$  er jordstasjonens høyde over havet mens  $h_R$  gir regnets høyde gitt ved

$$h_R(km) = \begin{cases} 3 + 0,028 \cdot \text{lengdegrad} & \text{hvis } 0 < \text{lengdegrad} < 36^0 \\ 4 - 0,075 \cdot (\text{lengdegrad} - 36) & \text{hvis } \text{lengdegrad} \geq 36^0 \end{cases} \quad (C-9)$$

$r_{0,01}$  er en faktor som tar hensyn til at regnintensiteten ikke er uniform gjennom hele skuren. Den er avhengig av horisontalprojeksjonen  $L_g$  av  $L_s$ :

$$r_{0,01} = \frac{1}{1 + \frac{L_g}{L_0}} \quad (C-10)$$

hvor



$$L_0 = 35e^{-0,015R_{0,01}} \text{ og } L_g = L_s \cos(\varepsilon) \quad (C-11)$$

Regndempningen for  $p$  mellom 0,001% og 1% av tiden er så gitt ved

$$A_R(p) = A_R(0,01) \cdot 0,12p^{-(0,546 + 0,043 \log p)} \quad (C-12)$$

Denne sammenhengen stemmer bra i Norge.

**APPENDIKS****D FREKVENSAVHENGIGE KOEFFISIENTER VED REGNDEMPEING**

f mellom 1 og 2 GHz

$$kH=3.87*10^{(-5)}*f^{1.9925};$$

$$kV=3.520*10^{(-5)}*f^{1.9710};$$

$$aH=0.1694*\log_{10}(f)+0.9120;$$

$$aV=0.1428*\log_{10}(f)+0.8800;$$

f mellom 2 og 4 GHz

$$kH=3.649*10^{(-5)}*f^{2.0775};$$

$$kV=3.222*10^{(-5)}*f^{2.0985};$$

$$aH=0.5249*\log_{10}(f)+0.8050;$$

$$aV=0.5049*\log_{10}(f)+0.7710;$$

f mellom 4 og 6 GHz

$$kH=2.199*10^{(-5)}*f^{2.4426};$$

$$kV=2.187*10^{(-5)}*f^{2.3780};$$

$$aH=1.0619*\log_{10}(f)+0.4816;$$

$$aV=1.0790*\log_{10}(f)+0.4254;$$

f mellom 6 og 7 GHz

$$kH=3.202*10^{(-6)}*f^{3.5181};$$

$$kV=3.041*10^{(-6)}*f^{3.4791};$$

$$aH=0.3585*\log_{10}(f)+1.0290;$$

$$aV=0.7021*\log_{10}(f)+0.7187;$$

f mellom 7 og 8 GHz

$$kH=7.542*10^{(-6)}*f^{3.0778};$$

$$kV=7.890*10^{(-6)}*f^{2.9892};$$

$$aH=-0.0862*\log_{10}(f)+1.4049;$$

$$aV=-0.0345*\log_{10}(f)+1.3411;$$

f mellom 8 og 10 GHz

$$kH=2.636*10^{(-6)}*f^{3.5834};$$

$$kV=2.102*10^{(-6)}*f^{3.6253};$$

$$aH=-0.5263*\log_{10}(f)+1.8023;$$

$$aV=-0.4747*\log_{10}(f)+1.7387;$$

f mellom 10 og 12 GHz

$$kH=3.949*10^{(-6)}*f^{3.4078};$$

$$kV=2.785*10^{(-6)}*f^{3.5032};$$

$$aH=-0.7451*\log_{10}(f)+2.0211;$$

$$aV=-0.8083*\log_{10}(f)+2.0723;$$

f mellom 12 og 15 GHz

$$kH=1.094*10^{(-5)}*f^{2.9977};$$

$$kV=7.718*10^{(-6)}*f^{3.0929};$$

$$aH=-0.6501*\log_{10}(f)+1.9186;$$

$$aV=-0.7430*\log_{10}(f)+2.0018;$$

f mellom 15 og 20 GHz

$$kH=4.339*10^{(-5)}*f^{2.4890};$$

$$kV=3.674*10^{(-5)}*f^{2.5167};$$

$$aH=-0.4402*\log_{10}(f)+1.6717;$$

$$aV=-0.5042*\log_{10}(f)+1.7210;$$

f mellom 20 og 25 GHz

$$kH=8.951*10^{(-5)}*f^{2.2473};$$

$$kV=3.674*10^{(-5)}*f^{2.2041};$$

$$aH=-0.3921*\log_{10}(f)+1.6092;$$

$$aV=-0.3612*\log_{10}(f)+1.5349;$$

f mellom 25 og 30 GHz

$$kH=8.779*10^{(-5)}*f^{2.2533};$$

$$kV=1.143*10^{(-4)}*f^{2.1424};$$

$$aH=-0.5052*\log_{10}(f)+1.7672;$$

$$aV=-0.3789*\log_{10}(f)+1.5596;$$

f mellom 30 og 35 GHz

$$kH=1.009*10^{(-4)}*f^{2.2124};$$

$$kV=1.075*10^{(-4)}*f^{2.1605};$$

$$aH=-0.6274*\log_{10}(f)+1.9477;$$

$$aV=-0.5527*\log_{10}(f)+1.8164;$$

f mellom 35 og 44 GHz

$$kH=1.304*10^{(-4)}*f^{2.1402};$$

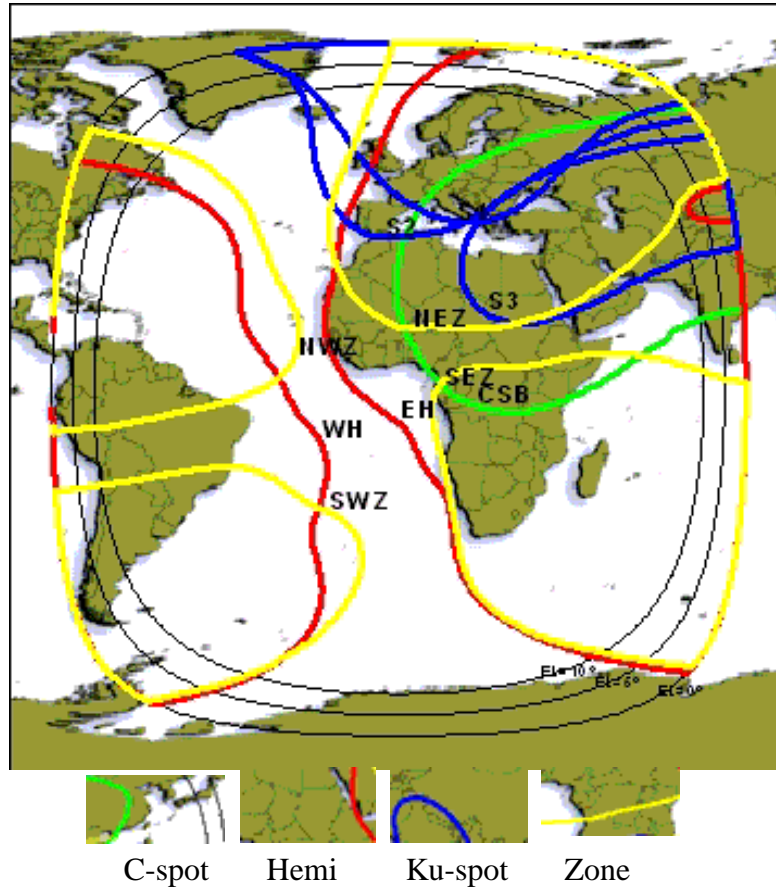
$$kV=1.163*10^{(-4)}*f^{2.1383};$$

$$aH=-0.6898*\log_{10}(f)+2.0440;$$

$$aV=-0.5863*\log_{10}(f)+1.8683;$$

**APPENDIKS**  
**E INTELSAT 707 1<sup>0</sup> W**

Data og parametere om denne satellitten er hentet fra [www.intelsat.com](http://www.intelsat.com) på Internett



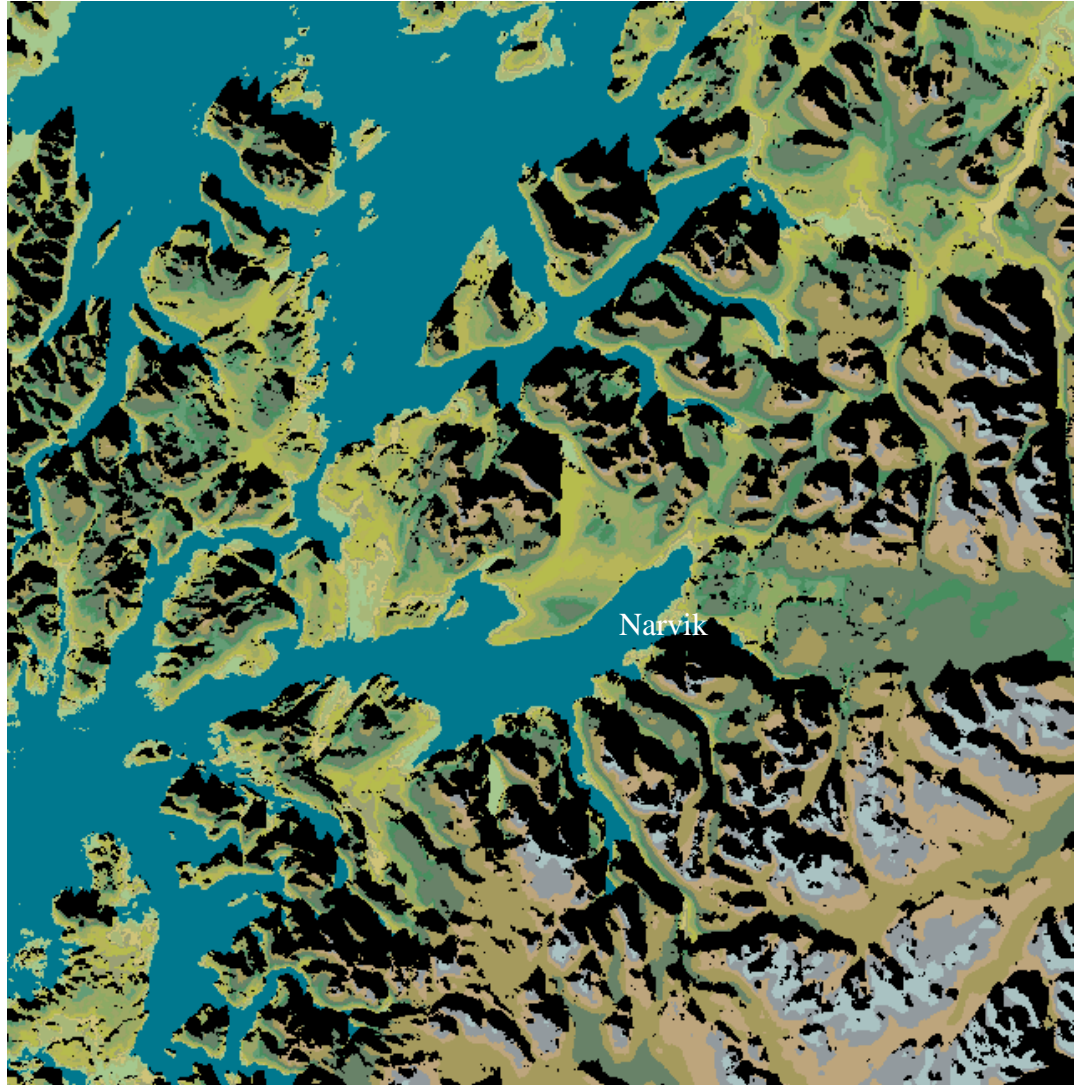
**Key Parameters**

<b>Total Transponders</b>	C-Band: 42 (in equiv. 36 MHz units) Ku-Band: 28 (in equiv. 36 MHz units)
<b>Polarization</b>	C-Band: Circular-R. Hand or L. Hand Ku-Band: Linear-Horizontal or Vertical
<b>e.i.r.p.</b> (Beam Edge to Beam Peak)	Global Beam: 29.0 up to 34.0 dBW Hemi Beam: 33.0 up to 40.0 dBW Zone Beam: 33.0 up to 40.0 dBW
<b>Uplink Frequency</b>	C-Band: 5925 to 6425 MHz Ku-Band: 14.00 to 14.50 GHz

<b>Total Transponders</b>	C-Band: 42 (in equiv. 36 MHz units) Ku-Band: 28 (in equiv. 36 MHz units)
<b>Downlink Frequency</b>	C-Band: 3700 to 4200 MHz Ku-Band: 10.95 to 11.20 GHz or 11.70 to 11.95 GHz or 12.50 to 12.75 GHz plus 11.45 to 11.70 GHz
<b>Typical G/T Range</b> (Beam Peak to Beam Edge)	Global Beam: -12.0 to -7.2 dB/K Hemi Beam: -8.7 to -1.6 dB/K Zone Beam: -9.2 to +1.0 dB/K C-Spot Beam: -5.0 to +2.9 dB/K Ku Spot 1: +0.9 to +9.6 dB/K Ku Spot 2: -4.1 to +6.3 dB/K Ku Spot 3: -1.8 to +7.2 dB/K
<b>SFD Range</b> (Beam Edge)	C-Band: -87.0 to -73.0 dBW/m <sup>2</sup> Ku-Band: -87.0 to -73.0 dBW/m <sup>2</sup>

I tillegg vil EIRP for Ku spot i retning Sør-Norge være omtrent 47 dB og noe mindre i Nord-Norge.

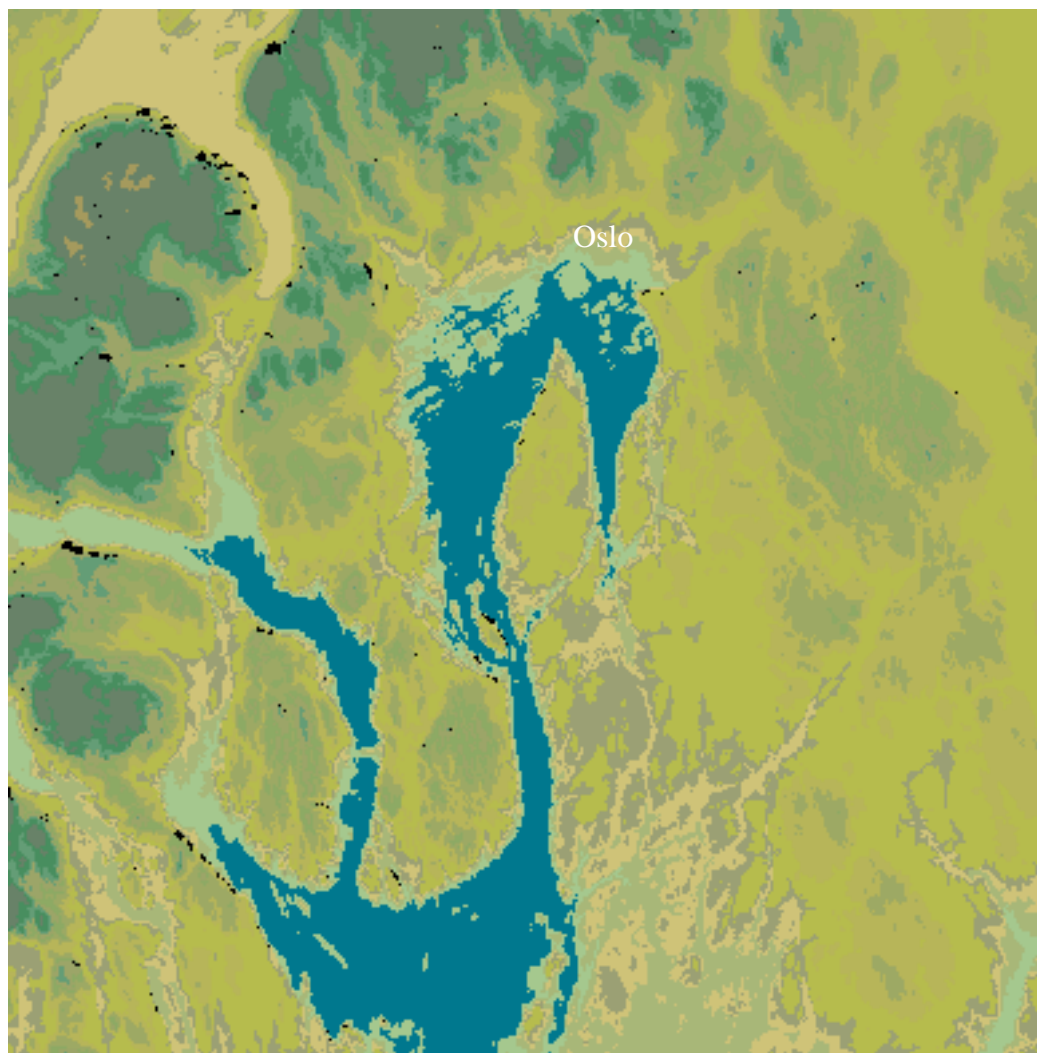
APPENDIKS  
F DEKNINGSDIAGRAMMER



*Figur F.1 Dekningsdiagrammet viser fjellskyggen (svarte felt) innerst i Lofoten/Narvik ved bruk av GEO satellitt på 1°W.*



*Figur F.2 Dekningsdiagrammet viser fjellskyggen (svarte felt) på Nordvestlandet ved bruk av GEO satellitt på 1°W.*



*Figur F.3 Dekningsdiagrammet viser fjellskyggen (svarte felt) rundt Oslofjorden ved bruk av GEO satellitt på 1°W.*



# FORDELINGSLISTE

**FFIE**      **Dato:** 27 juni 2001

RAPPORTTYPE (KRYSS AV) <input checked="" type="checkbox"/> RAPP <input type="checkbox"/> NOTAT <input type="checkbox"/> RR	RAPPORT NR 2000/03466	REFERANSE: 742/110	RAPPORTENS DATO: 27 juni 2001
RAPPORTENS BESKYTTELSESGRAD  UGRADERT		ANTALL EKS UTSTEDT  50	ANTALL SIDER  57
RAPPORTENS TITTEL  TAKTISK SATELLITTKOMMUNIKASJON		FORFATTER(E)  ARNESON Vegard, FARSUND Bodil Hvesser	
FORDELING GODKJENT AV FORSKNINGSSJEF:		FORDELING GODKJENT AV AVDELINGSSJEF:	

## EKSTERN FORDELING

## INTERN FORDELING

ANTALL	EKS NR	TIL	ANTALL	EKS NR	TIL
1		FO/I	14		FFI-Bibl
1		FO/HST	1		Adm dir/stabssjef
1		SBINSP	1		FFIBM
1		HFK	1		FFIE
1		LFK	1		FFIN
1		SFK	1		FFISYS
1		SFK/T-TKK	1		Torleiv Maseng, FFIE
1		v/overing Knut Grimstad	1		Svein Haavik, FFIE
1		FTD	1		Vegard Arneson, FFIE
		www.ffi.no	1		Karsten Bråthen, FFIE
			1		Jon Buer, FFIE
			1		Torkild Eriksen, FFIE
			1		Ove Grønnerud, FFIE
			1		Bodil Hvesser Farsund, FFIE
			1		Bjørn Jacobsen, FFIE
			1		Vivianne Jodalen, FFIE
			1		Anton Leere, FFIE
			1		Stig Løddøen, FFIE
			1		Ole Martin Mevassvik, FFIE
			1		Kjetil Mosesen, FFIE
			1		Snorre Prytz, FFIE
			1		Kjell Rose, FFIE
			1		Jostein Sander, FFIE
			6		Arkiv, FFIE
					FFI-veven

FFI-K1

Retningslinjer for fordeling og forsendelse er gitt i Oraklet, Bind 1, Bestemmelser om publikasjoner for Forsvarets forskningsinstitutt, pkt 2 og 5. Benytt ny side om nødvendig.